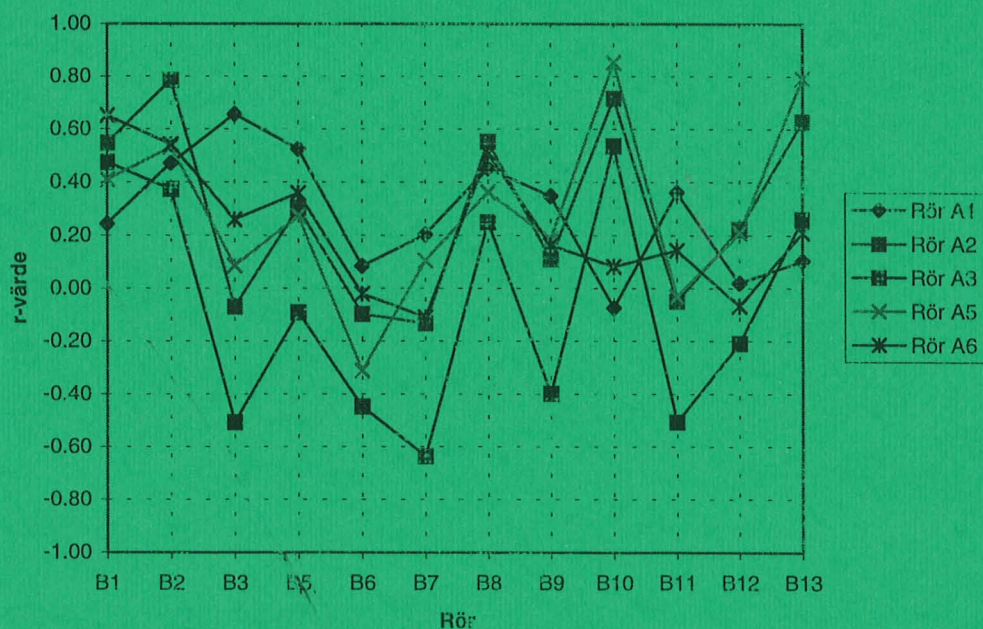


Variationsmönster hos grundvattennivåerna i skogsmark

Fältstudier I Norunda under hösten 1995

Niklas Ingvar-Nilsson



Examensarbete

Handledare : Per-Erik Jansson

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Avdelningsmeddelande 98:4
Communications

Uppsala 1998

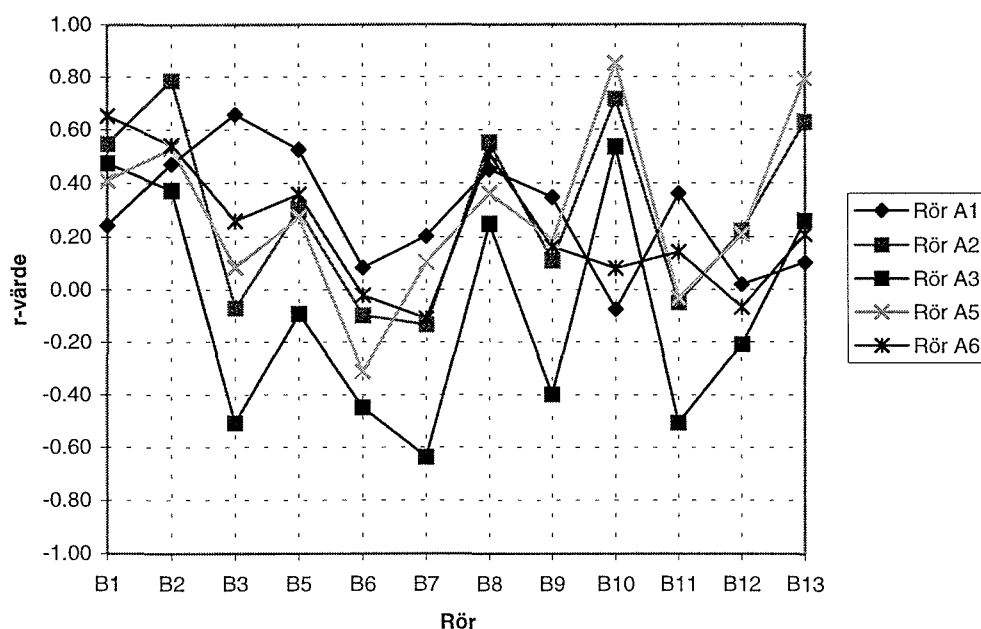
ISSN 0282-6569

ISRN SLU-HY-AVDM--98/4--SE

Variationsmönster hos grundvattennivåerna i skogsmark

Fältstudier I Norunda under hösten 1995

Niklas Ingvar-Nilsson



Examensarbete

Handledare : Per-Erik Jansson

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Avdelningsmeddelande 98:4
Communications

Uppsala 1998

ISSN 0282-6569

ISRN SLU-HY-AVDM--98/4--SE

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

ABSTRACT	5
1. INLEDNING.....	5
1.1 Teorier om grundvatten i skogsmark.....	6
1.1.1 En enkel tankemodell.....	6
1.1.2 En mer matematisk modell	8
2. MATERIAL OCH METODER.....	15
2.1 Området	15
2.2 Två längre transekter	15
2.3 Automatiska mätningar i en kortare transekt.....	18
2.4 Statistik för analys av variationsmönster	21
3. RESULTAT OCH DISKUSSION	21
3.1 Variationsmönster mellan olika transekter under en femmånadersperiod ..	21
3.2 Detaljerade variationsmönster i ett litet delområde	35
3.3 Val av statistisk metod.....	38
4. SLUTSATSER.....	39
5. TACKORD	40
6. REFERENSER.....	40
7. APPENDIX	42
7.1 Korrelation inom transekt A.....	42
7.2 Korrelation inom transekt B.....	44
7.3 God korrelation mellan dessa rör.....	48
7.4 Resultat rör för rör av de automatiska mätningarna i transekt E.....	50
7.5 Lista över symboler.....	52

ABSTRACT

The aim of this study was to get a deeper understanding of the quick rise of groundwater table in a forest area. During the summer of 1995 19 groundwater pipes were established in two longer transects (A and B) in order to monitor the variability in time and space of the groundwater table. The pipes was measured every 1-3 weeks with a blowpipe from late summer to early winter. A short transect (E) was established in autumn 1995 on a gentle slope in the area with 7 groundwater pipes in order to make a detailed study. The short transect was measured both manually, with a blowpipe, and automatically, with a logger. For the two long transects, it was found that the correlation between the pipes was not depended of the distance between the different pipes. It was also found that the correlation on the first half of the period was generally much lower than the later half of the period. The automatic measurements revealed that the rising of the groundwater table was very quick (hours). The most important soil factors for controlling the fluctuations of the ground water table may be the hydraulic conductivity and the effective porosity of the soil.

1. INLEDNING

Moränmarkernas hydrologiska egenskaper har varit dåligt undersökta, trots att moränmark täcker cirka 75 % av Sveriges yta. Orsaken torde vara kombinationen av den stora heterogeniteten, som gör det svårt att få "bra" och representativa värden, samt den ofta blockrika terrängen, som gör det svårt och arbetsamt att få ner lämplig utrustning i marken. Markforskare har ofta föredragit att göra undersökningar på mera lättarbetad mark. Det är först på 1980-talet som hydrologer på allvar har börjat titta närmare på moränmarkens hydrologiska egenskaper (Lundin, 1982; Johansson, 1987 och Espeby, 1987) och fått ökad förståelse för hur vattnets flöden i moränmark fungerar.

I början på 90-talet etablerades projektet, NOPEX (Northern hemisphere climate Process land-surface EXperiment), där forskarna närmare vill studera de utbytesprocesser som sker mellan mark, vegetation och atmosfär i ett skogsdominerat landskap. Dessa studier kan förbättra våra modeller om hur vattenbalansen fungerar i ett skogsdominerat landskap. Att förstå grundvattnets rörelser och fluktuationer är en viktig förutsättning för att kunna förutsäga översvämningar, sinande brunnar och hur transport av lösta ämnen i grundvatten sker.

Lindahl (1996) gjorde, i sitt examensarbete, en pilotstudie över vattenbalansen i Norunda försöksområde under den rekordvarma sommaren 1994. Hon gjorde, som en mindre del av sitt arbete, simuleringar av grundvattnets nivå och där hon försökte återge resultat av mätningar som SGU har gjort. Hon lyckades förklara grundvattnets sänkning i början av sommaren, men inte alls den kraftiga stigning som skedde snabbt under hösten. Hennes arbete indikerade att det fanns behov att närmare undersöka markens hydrologiska egenskaper i de djupare lagren. En viktig fråga är om de rapporterade resultaten representerar en enstaka företeelse eller om hennes slutsatser är allmängiltiga över hela området. Det fanns därför ett intresse att titta närmare på

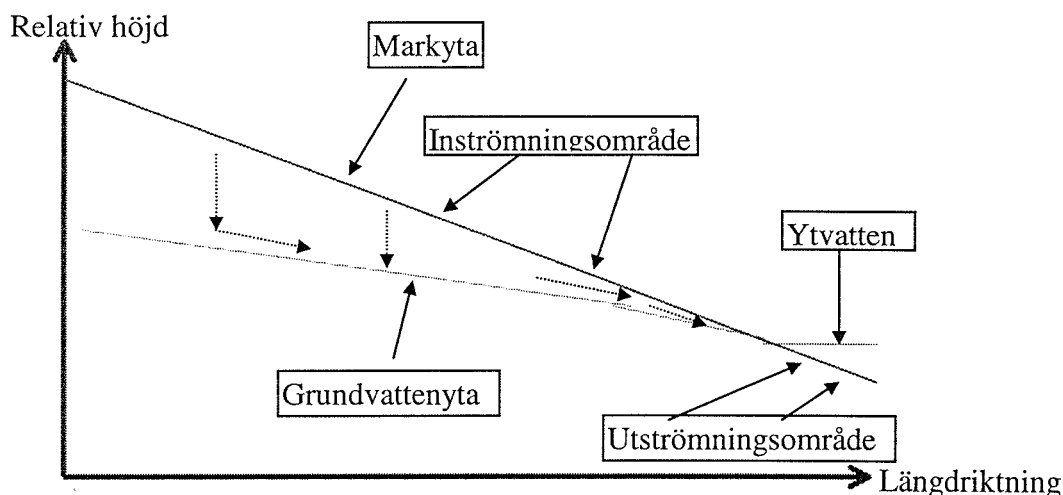
just grundvattnets stigning över ett större del av försöksområdet under en tid då grundvattenbildning äger rum.

Målsättningen med mitt arbete är att, med hjälp detaljerade mätningar med hög tidsupplösning samt mätningar över större områden, få en bättre förståelse för hur grundvattnet fluktuerar i moränmark. Mer specifikt att försöka förklara varför grundvattenytan varierar på ett givet sätt både i tid och rum.

1.1 Teorier om grundvatten i skogsmark

1.1.1 En enkel tankemodell

Min tankemodell är att grundvattnet i princip följer markytans relief och rör sig då från högre belägna områden (s.k. inströmningsområden) till lokala depressioner (myrmark) för att slutligen mynna ut i bäckar, åar och sjöar (s.k. utströmningsområden). Vattendelare kan vara kullar, åsar och andra höjdformationer i terrängen. Grundvattenytan ligger djupast under markytan vid vattendelaren och närma sig markytan mot utströmningsområdet (figur 1). Med andra ord ligger grundvattnet djupare under markytan vid inströmningsområdet än utströmningsområdet. Däremot ligger grundvattnets absolutnivå (t.ex. höjd över havet) högre i inströmningsområdet än i utströmningsområdet. Markens porsystem är grövre i inströmningsområden än i utströmningsområden. Den hydrauliska konduktiviteten är klart större i inströmningsområden än i utströmningsområden. Den är hög närmast markytan men avtar exponentiellt med djupet.

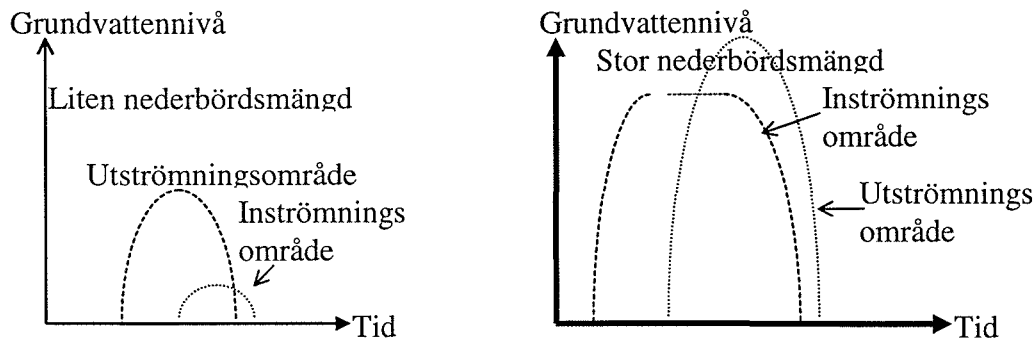


Figur 1. Min tankemodell för grundvattenflöden i marken. Grundvattenytan kommer allt närmare markytan ju längre ner i sluttningen för att till sist komma ut ovan markytan som ytvatten. Det streckade linjerna är vattnets tänkta transportväg vid nederbörd eller snösmältning. Notera att grundvattenytan ligger nära markytan en bit innan den kommer ut i dagen.

Små nederbörds mängder bör inte nämnvärt påverka grundvattenytans nivå i inströmningsområdet, p.g.a. markens stora effektiva porositet¹. Däremot kan det påverka grundvattennivån i utströmningsområdet, p.g.a. marken här har låg effektiv porositet (se figur 2). Stor effektiv porositet kräver att mycket vatten tillförs, för att grundvattennivån ska ändras ordentligt. Med liten effektiv porositet räcker det med en liten vattentillförsel för att en tydlig grundvattenrespons ska ske.

Vid större nederbörds mängder, eller snösmältning, stiger grundvattnet kraftigt i inströmningsområdet. I utströmningsområdet stiger grundvattnet snabbt upp till de ytliga marklagren med mycket hög hydraulisk konduktivitet. "Överflödigt" grundvatten transporteras då snabbt bort. Detta gör att grundvatten kan ligga nära markytan längs en längre sträcka utan att komma upp i dagen. Grundvattenkurvans topp får då ett "avhugget" utseende istället för den normala "sockertoppen" (figur 2).

Under normala infiltrationsförhållanden, i mindre avrinningsområden, bör grundvattenstigningen först komma i utströmningsområden och senare i inströmningsområden, oberoende om det är liten eller stor nederbörds mängd som kommer (figur 2). Det beror på att grundvattenytan är ytligare i utströmningsområdet i kombination med att där är den effektiva porositeten betydligt lägre. Med andra ord betyder det att mindre vatten behöver infiltrera en kortare bit vid utströmningsområdet än inströmningsområdet vilket bör gå fortare.



Figur 2. Effekter på grundvattenytan av små respektive stora nederbörds mängder enligt min tankemodell. Småstreckad linje är ett typiskt inströmningsområde och den långstreckiga linjen är en plats som omväxlande är inströmningsområde och omväxlande utströmningsområde. Notera den avhuggna toppen för utströmningsområdets grundvattenkurva i den högra figuren. Det innebär att grundvattenytan har kommit upp i det översta marklagren med hög hydraulisk konduktivitet.

I större avrinningsområden kan t.ex. lokala regnskurar, som bara berör delar av avrinningsområdet, göra att detta mönster bryts. Har inströmningsområdet betydligt högre infiltrationskapacitet ner till grundvattnet än utströmningsområdet, kan dock

¹ Med effektiv porositet avses här den aktuella andelen luftfyllda porer av den totala mängden jord. Egentligen är effektiv porositet den volym luft som finns i en jord vid fältkapacitet.

förhållanden vara det omvända. Man får dock tänka på att det är infiltrationskapaciteten ner till grundvattenytan som är av betydelse, inte infiltrationskapaciteten vid ett speciellt djup.

1.1.2 En mer matematisk modell

Den teori som beskrivs i kapitel 1.1.1 är kvalitativ och kan grovt förklara mekanismerna bakom flöden men den ger ingen kvantitativ uppskattning hur stort flödet är eller hur hög en grundvattenstigning blir eller hur snabbt den sjunker igen. Det finns dock en del ekvationer som försöker kvantifiera dessa flöden och grundvattenförändringar.

1.1.2.1 Grundläggande begrepp

I hydrologiska sammanhang används ofta uttrycket potential som är vattnets potentiella energi i en punkt (Koorevaar *et.al.*, 1983). Potentialen kan delas upp i tryckpotential, gravitationspotential och osmotisk potential enligt ekvation 1

$$H = H_t + H_g + H_o \quad (1)$$

Tryckpotentialen (H_t) kan motsvara trycket från ovanliggande vattenpelare och sätts, genom en konvention, till noll vid den fria grundvattenytan. Gravitationspotentialen (H_g) är vattnets lägesenergi och sätts från en godtycklig referens. Osmotiska potentialen (H_o) är ett mått på vattnets "salthet". Skillnader i osmotisk potential i ett vattensystem finns bara när ett semipermeabelt membran (t.ex. cellmembran) finns närvarande. I detta arbete kommer effekter av den osmotiska potentialen att negligeras. Är tryckpotentialen negativ ($H_t < 0$) används begreppet tension.

Det bundna markvattnet är (vid jämnvikt) begränsad till de finare porerna i marken. Ju finare porer desto högre tension krävs för att marken ska släppa vattnet ifrån sig. Den tension som krävs för att hålla kvar vattnet med porradien r_{\max} är

$$H_t = \frac{2 \sigma \cos \varphi}{\rho g r_{\max}} \quad (2)$$

där H_t är bindningstrycket (tryckpotentialen (m.v.p.)) och φ är kontaktvinkeln mellan vattnet och det fasta mediet. Normalt sätts vinkeln till 180° för förhållandet mark/vatten och $\cos \varphi$ blir då -1. σ är ytspänningen som är 0,07 N/m för vatten. ρ vattnets densitet (1000 kg/m^3), g är gravitationskonstanten ($9,82 \text{ N/kg}$ i Sverige) och r_{\max} är den maximala porradien (m) som kan hålla kvar vattnet vid trycket H_t (Koorevaar *et.al.*, 1983). Genom att sätta in värdena på konstanterna i ekvation (2) fås ett förenklat uttryck

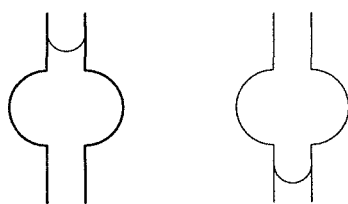
$$H_t = - \frac{1,43 \times 10^{-5}}{r_{\max}} \quad (3)$$

Minustecknet indikerar att bindningstrycket blir negativt (tension). Omvänt blir då

$$r_{\max} = - \frac{1,43 \times 10^{-5}}{H_t} \quad (4)$$

Notera att alla finare porer än r_{\max} är vattenfyllda vid jämnvikt och att alla grövre porer än r_{\max} är luftfyllda. Enligt ekvation (2-4) minskar den maximala porradien som krävs för att hålla vatten med ökad tension och sålunda minskar vattenhalten i marken med ökad tension och *vice versa*.

Genom att studera hur vattenhalten (θ) ändras med ändrad tension ($\partial\theta/\partial H_t$) fås en s.k. bindningskurva, pF-kurva. Den är unik för varje markprofil och marklager. Dess utseende påverkas dock av fenomenet hysteresis som beror på att markens porsystem inte ser ut som raka rör utan är fylld av ojämnheter. Det gör att om marken går från ett torrare till ett fuktigare tillstånd, får den lägre vattenhalt än om marken går från ett fuktigare till ett torrare tillstånd, detta trots samma tension (figur 3). Anledningen är att det är de smalare partierna (mindre porradie) av porerna som ger dem "kraft" att hålla kvar vattnet. För att vattnet ska "övertvinna" det "hinder" som de bredare partierna (ökad porradie) av porerna utgör måste tensionen först minska.



Figur 3. Effekterna av hysteresis i ett porsystem. Den vänstra figuren är ett tillstånd då marken blir torrare och den högra då marken blir fuktigare.

1.1.2.2 Grundläggande flödesekvationer

En av det mest grundläggande flödesekvationer är Darcys lag som säger att flödet är proportionellt mot potentialgradienten enligt ekvation 5

$$q = -k \frac{\partial H}{\partial s} \quad (5)$$

där q är flödestätheten (m/s), H är totalpotentialen (m.v.p.), s är avståndet i valfri riktning (m), k är en proportionalitetskonstant kallad hydraulisk konduktivitet (m/s) och är unik för varje jord och markprofil. Minustecknet betyder att vattnet alltid rinner från områden med högre totalpotential till områden med lägre totalpotential. Vid jämnvikt är $\partial H/\partial s = 0$ och inget flöde sker.

Den hydrauliska konduktiviteten, k , är starkt beroende av vattenhalten och man brukar då skriva ekvation 5 enligt följande

$$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial s} \quad (6)$$

där θ är vattenhalten i marken uttryckt i volymsprocent av den totala markvolymen. För många jordar ökar den hydrauliska konduktiviteten logaritmiskt med vattenhalten (Koorevaar *et.al.*, 1983). Det finns dock mer allmängiltiga försök att beskriva hur konduktiviteten varierar med vattenhalten men den förutsätter att markens bindningskurva är känd. Koorevaar *et.al.*, (1983) beskriver en ekvation (7) hur den

hydrauliska konduktiviteten varierar med den effektiva pordiametern på de porer som är vattenfyllda.

$$k = \left(\frac{\rho g}{8 \eta} \right) \left(\frac{\sum (\Delta \theta)_i r_i^2}{\tau} \right) \quad (7)$$

där r_i är den effektiva porradien, η är den dynamiska viskositeten för vatten (0,001 Pas), τ är slingrighetskonstanten (dimensionslös). ρ är densiteten för vatten (1000 kg/m³) och g är gravitationskonstanten (i Sverige 9,82 N/kg). Slingrighetskonstanten varierar kraftigt mellan olika jordar från ca 2 till över 2000 och är ett mått på den "omväg" vattnet måste ta i jorden runt partiklarna. I denna modell ser man alltså markens porsystem som en massa krökta "rör" med olika radie (r_i)

Ekvation 7 ger alltså att k -värdet ökar med den effektiva porradien i kvadrat vilket t.ex. förklarar varför en sandjord har högre mättad hydraulisk konduktivitet än en mjälajord. Den förklarar också varför den hydrauliska konduktiviteten minskar i svällande lerjord. Visserligen ökar den totala porositeten när lerorna sväller men det är de små porerna blir fler och det stora porerna och sprickorna försvinner (Koorevaar *et.al.*, 1983).

Ekvation 7 tar, liksom andra försök att beskriva hur den hydrauliska konduktiviteten varierar med tensionen, $k(H_t)$, inte hänsyn till hysteresis (figur 3) och därmed är mindre lyckade för att beskriva konduktiviteten i en mark (Hillel, 1982). Den kan bara användas för att bestämma k -värdet i grova drag, även i en sandjord (Koorevaar *et.al.*, 1983).

Då vattenflöden i marken äger rum måste vattenhalten öka när vattnet strömmar till en given punkt och följaktligen minska när vattnet strömmar ifrån den givna punkten. Denna princip beskrivs bäst av den s.k. kontinuitetsekvationen för endimensionellt flöde

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial s} \quad (8)$$

där t är tiden.

Avståndet s kan delas upp i "komposanter" i x -, y - och z -led

$$s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (9)$$

där x är avståndet i x -led, y är avståndet i y -led och z är avståndet i z -led. Genom en konvention är x - och y -led i horisontell riktning och z -led vertikal riktning.

Flödet, q , kan delas upp enligt

$$q = q_x + q_y + q_z \quad (10)$$

där då totalflödet är summan av alla delflöden.

Genom att kombinera ekvation (8-10) fås ett mer generellt sätt att skriva kontinuitetsekvationen är

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (11)$$

där flödet tillåts variera i alla riktningar. Genom att kombinera ekvation (11) med ekvation (6) fås

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (12)$$

där både potentialgradienten och den hydrauliska konduktiviteten (och följaktligen flödet) tillåts variera i både x-, y- och z-led, vilket de ofta gör i naturen.

1.1.2.3 Infiltration

Infiltration är när marken får ett tillskott av vatten (t.ex. genom snösmältning, regn, bevattning) som rinner ner i marken enligt kontinuitetsekvationen (ekvation 8) och Darcys lag (ekvation 6). Infiltrationen slutar då potentialgradienten $\partial H / \partial s = 0$

Empiriskt har flera forskare funnit att den mängd vatten som kan infiltrera en jord på en given yta (markens infiltrabilitet) är hög i början för att sedan minska tills den når ett konstant ("slutligt") värde. Flera försök har också gjorts för att empirisk beskriva hur denna minskning ser ut (Hillel, 1982) t.ex. Green och Amts förslag (1911)

$$i = i_c + \frac{b}{I} \quad (13)$$

där i_c och b är karakteriseringskonstanter där i_c är den "slutliga" (steady-state) infiltrationen. Vidare är i infiltrationsflödet och I den totala infiltrerade mängden vatten över tiden t . Även Horton (1940) hade ett förslag

$$i = i_c + (i_0 - i_c) e^{-kt} \quad (14)$$

där i_c , i_0 och k är karakteriseringskonstanter där i_0 är infiltrationen vid tiden $t=0$ och k beror på hur snabbt det går från i_0 till i_c (Hillel, 1982).

Infiltrationen kan delas upp i horisontell infiltration och vertikal infiltration. Vid den förra varianten är gravitationspotentialen, H_g , konstant och enbart tryckpotentialen behöver beaktas (Koorevaar *et.al.*, 1983). Vid vertikal infiltration behöver både gravitationspotentialen och tryckpotentialen beaktas (Koorevaar *et.al.*, 1983).

Enligt Hillel (1982) kan 4 distinkta zoner igenkännas i tur och ordning vid infiltration från markytan och nedåt, nämligen

- 1) mättad zon (engelska "saturated zone")
- 2) transmissionszon (engelska "transmission zone")
- 3) vätningszon (engelska "wetting zone")
- 4) vätningsfront (engelska "wetting front")

Den mättade zonen (1) är den översta zonen som är helt vattenmättad. Den är alltid tunn och kan vara en artefakt vid forskningen (Hillel, 1982). Transmissionszonen (2) är nästan vattenmättad (s.k. saturation) men har luftbubblor inestängda i vissa porer (därav uttrycket "nästan mättad"). Under infiltrationens gång förlängs transmissionszonen med tiden. I både den mättade zonen och i transmissionszonen kan gradienten för tryckpotentialen försummas ("nästan mättade" förhållanden) och

det är sålunda gradienten av gravitationspotentialen som är styrande för infiltrationens hastighet (Hillel, 1982). Sålunda är infiltrationen i horisontal led försumbar. I vätningszonen (3) minskar vattenhalten med djupet och gradienten i tryckpotentialen blir sålunda allt större och horisontala infiltrationen får ökad betydelse. Längst ner är vätningsfronten (4) där gradienten i tryckpotential är mycket större än gradienten i gravitationspotential som kan försummas. Här är den horisontella infiltrationen i princip lika stor som den vertikala infiltrationen (Hillel, 1982).

Vid analys av vad som händer rent fysikaliskt vid de olika zonerna kan det vara lämpligt att utgå från ekvation (11) för härleda därifrån. Vatten strömmar mot vätningsfronten där horisontell infiltration kan vara lika stor som den vertikala infiltrationen och vattenhalten ökar i alla led med tiden. I ekvationsform blir då

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \approx \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (15)$$

eller ännu tydligare

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial (H_p)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(\theta) \frac{\partial (H_p)}{\partial y} \right) \approx \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial (H_g + H_p)}{\partial z} \right) \quad (16)$$

där gravitationspotentialen, H_g , är konstant i x-led och y-led men inte i z-led. I takt med att vattenhalten ökar, ökar också tryckpotentialen enligt ekvation (2) och till slut blir tryckpotentialgradienten negligerbar och vätningsfronten har övergått via vätningszonen till transmissionszonen. Där är vattenhalten konstant och enbart gradienten i gravitationspotential styr det nedåtriktade och konstanta flödet i marken. Ingen vattentransport sker i horisontal led i transmissionszonen. Matematiskt kan det beskrivas

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

som också kan skrivas

$$k_s \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (18)$$

där k_s är mättad hydraulisk konduktivitet i marken. Eftersom $k_s > 0$ blir då

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (19)$$

vilket brukar benämnas Laplace ekvation (Hillel, 1982).

Ett specialfall av infiltration är när grundvattnet trycker på underifrån (Hillel, 1982), t.ex. vid en källa (artesiskt vatten). Då får vattnet kämpa emot gravitationen och vi får inget steady-state infiltration (där enbart gravitationspotentialen styr). Tryckpotentialen blir också positiv.

När allt vatten har infiltrerat marken kommer vattnet att fortsätta transporteras ner mot grundvattnet (som stiger) för att tillslut ställa sig i jämvikt med grundvattenytan ($\partial H / \partial z = 0$). De högre belägna lagren kommer då att gradvis tömmas på vatten och fylla på lägre liggande lager. Denna omdistribution är en långsam process som sällan hinner bli färdig i naturen. Gradienterna minskar i profilen och ovanför

grundvattenytan minskar vattenhalten och därmed också den hydrauliska konduktiviteten.

1.1.2.4 Grundvattendränering

När grundvattenytan plötsligt stiger kommer även grundvattnet att sträva efter att ställa sig i jämvikt med övriga vattensystem (floder, sjöar....). Det har gjorts många försök att beskriva hur ett jämviktsläge uppträder, och en av de mest använda är Hooghoudt's ekvation (Hillel, 1982) som bygger på följande antaganden

- 1) Marken är homogen och har konstant hydraulisk konduktivitet
- 2) Marken har dräneringsrör som är parallella och på lika avstånd från varandra.
- 3) Den hydrauliska gradienten i varje punkt under grundvattenytan är lika med grundvattenytans lutning ovanför denna punkt. Gradienten är riktad mot närmaste dräneringsrör.
- 4) Darcys lag är tillämpbar
- 5) Ett "ogenomträngligt" lager ligger på ett visst djup under dräneringsrören.
- 6) Det fylls på med vatten ovanifrån (regn. snösmältning...) med konstant hastighet.
- 7) Formen på grundvattenytan mellan grundvattenrören är en elliptisk båge.

Om man antar symmetri mellan dräneringsrören med avståndet (S) mellan rören, kan vi dra ett vertikalt mittplan mellan dräneringsrören som fungerar som en sorts vattendelare. Avståndet mellan mittplanet och dräneringsrören blir då $\frac{1}{2} S$. Genom ett godtyckligt vertikalt plan med avståndet x ifrån dräneringsrören (figur 4)

Den mängd vatten som passerar per tidsenhet (Q) blir då perkolationsflödet (q) multiplicerat med avståndet mellan mittplanet och detta godtyckliga plan

$$Q = -q(\frac{1}{2}S - x) \quad (20)$$

samtidigt som samma flöde (Q) också kan erhållas genom Darcys lag

$$Q = -kH \frac{dH}{dx} \quad (21)$$

För att härleda Hooghoudt formel kombineras dessa två flödesekvationer

$$q(\frac{1}{2}S - x) = kH \frac{dH}{dx} \Rightarrow \int_0^{\frac{S}{2}} q(\frac{1}{2}S - x)dx = \int_0^{\frac{H_s}{2}} (kH)dH \quad (22)$$

som kan integreras till

$$\left[qSx - qx^2 \right]_0^{\frac{S}{2}} = \left[kH^2 \right]_0^{\frac{S}{2}} \quad (23)$$

Genom att anta att $x=0$ vid dräneringsrören ger att $H=d_a$ (avståndet mellan dräneringsrören och det ogenomträngliga lagren. Vid $x=\frac{1}{2}S$ (vid mittplanet) blir $H = H_{\max} = h_{\max} + d_a$ där h_{\max} är det maximala höjden som grundvattnet kan anta ovanför dräneringsrören. Genom att anta att grundvattenbågen är elliptisk mellan dräneringsrören blir då avståndet mellan dräneringsrören

$$S^2 = \left(\frac{4kh_{\max}}{q} \right) (2d_a + h_{\max}) \quad (24)$$

Enligt denna modell kan då avståndet mellan dräneringsrören öka med ökad hydraulisk konduktivitet. Med ökad perkolation måste avståndet mellan dräneringsrören minska. Djupet till det ogenomträngliga lagret måste dock vara känt (Hillel, 1982).

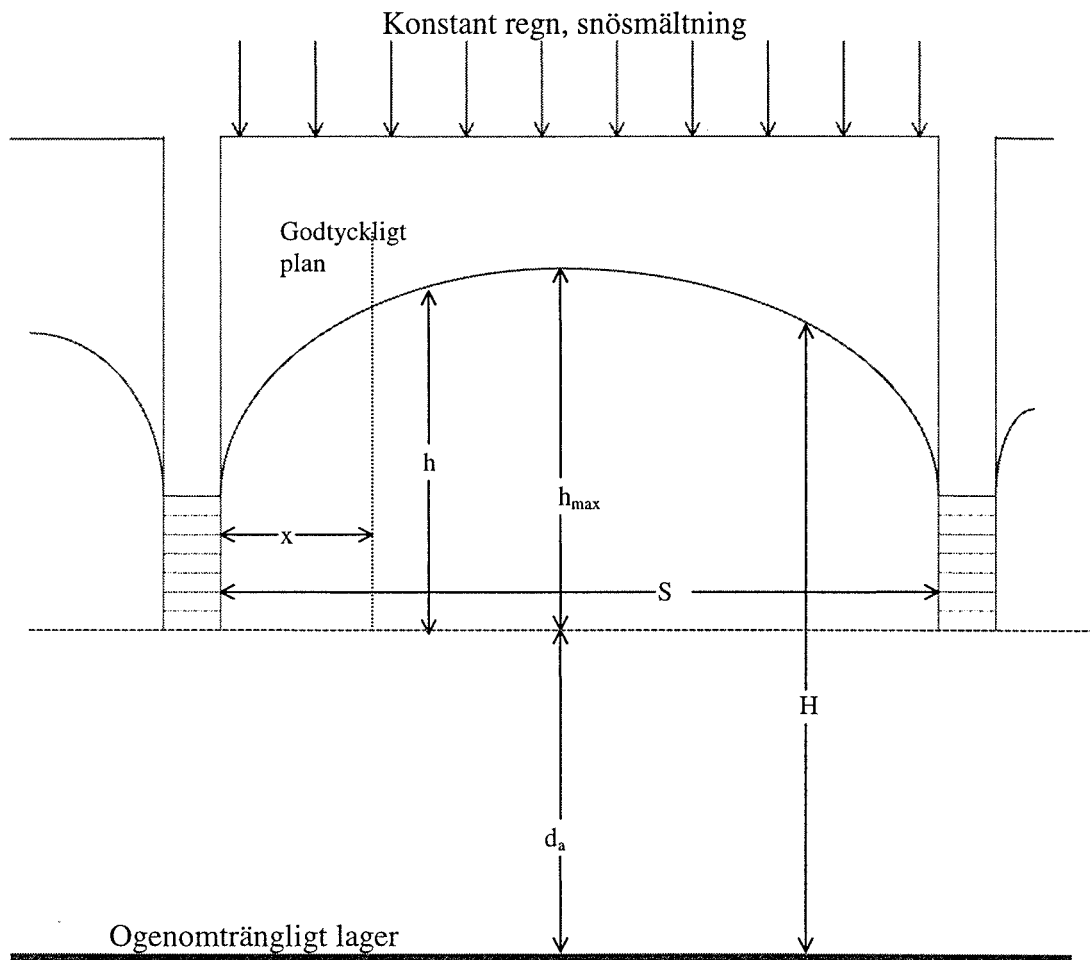
Om det ogenomträngliga lagret ligger på mycket stort djup ($h \ll d_a$) blir då

$$S^2 = \frac{4kh_{\max}}{q} 2d_a \quad (25)$$

och den maximala höjden på grundvattenbågen i mittpunkten $x=S/2$ blir då

$$h_{\max} = \frac{qS^2}{8kd_a} \quad (26)$$

Den maximala höjden av grundvattenbågen ovanför dräneringsrören är sålunda direkt proportionellt med flödet och proportionellt mot avståndet mellan dräneringsrören i kvadrat men omvänt proportionellt mot den hydrauliska konduktiviteten och avståndet till det ogenomträngliga lagret.



Figur 4. Hooghoudts tankemodell för grundvattenavrinning.

2. MATERIAL OCH METODER

Detta examensarbete är uppdelat på en fältdel, där grundvattennivån mättes under sensommaren hösten och förvintern 1995, och en bearbetningsdel, som gjordes under våren 1998. Fältdelen kan i sin tur uppdelas på de manuella grundvattenmätningarna (med blåsrör 27/7-14/12-95) och de automatiska grundvattenmätningarna (med datalogger 26/10-14/12-95).

2.1 Området

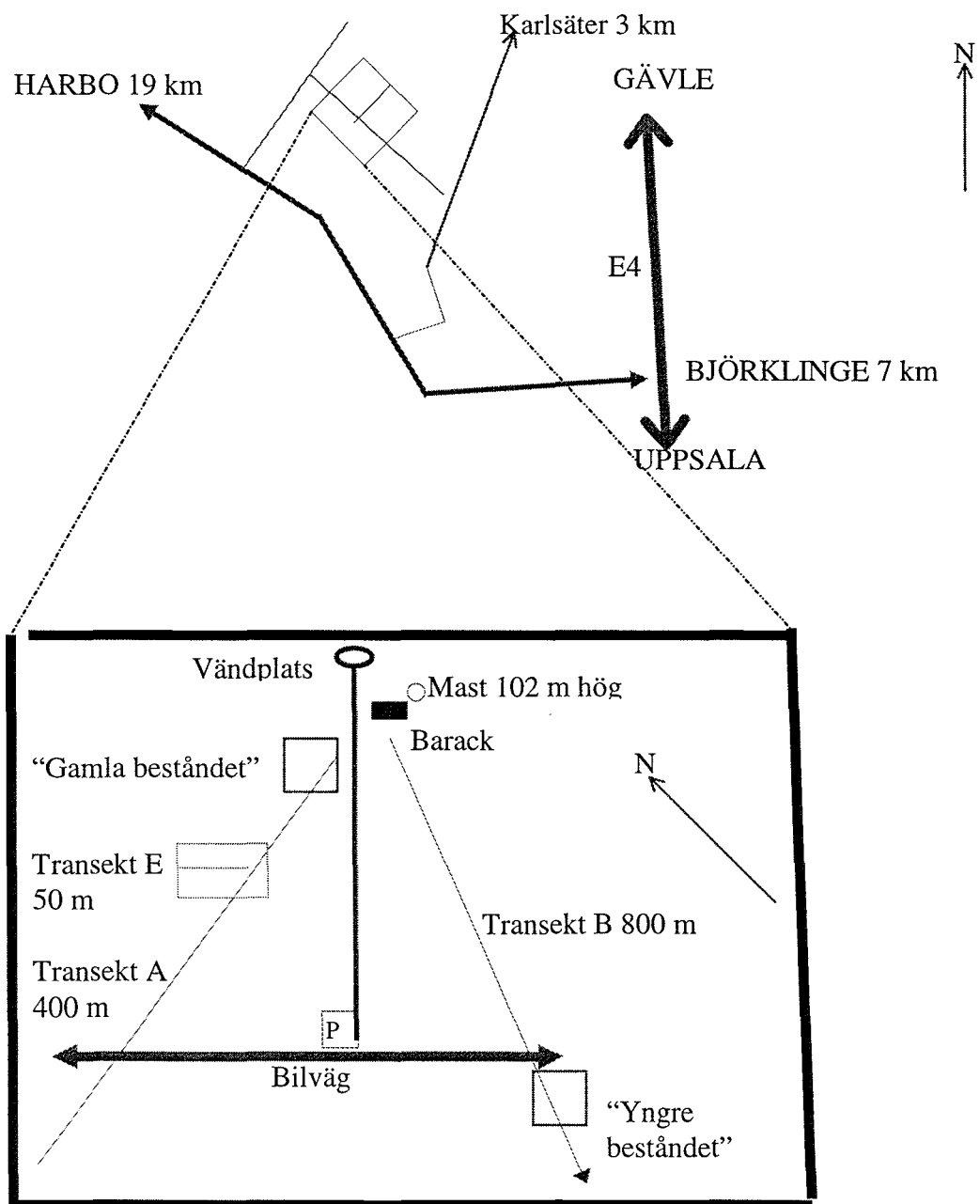
Undersökningsplatsen kallas Norunda, efter markägaren Norunda Häradsallmänning, och ligger ca 3.5 mil nordnordväst (NNV) om Uppsala (fig. 5). Närmare bestämt ca 1 mil nordväst om Björklinge mot Harbo. Området, som ligger ca 45-50 m.ö.h. är en blockrik isälvsavlagring med leravlagringar i sänkorna. Området är ganska flackt men det finns en hel del småsänkor och småkullar i området.

Vegetationen domineras av tall (*Pinus sylvestris*) och gran (*Picea abies*) men de blötare partierna står träden glesare. Fältskiktet domineras av blåbär (*Vaccinium myrtillus*) och lingon. (*Vaccinium vitis-idaea*). Bottenskiktet domineras av husmossa (*Hylocomium splendens*) och väggmossa (*Pleurozium schreberi*), vitmossor (*Sphagnum spp*) dominerar de blötare partierna.

2.2 Två längre transekter

Under försommaren utsattes 2 stycken TDR-transekter (TDR= Time-Domain Reflectory), A (längd ca 400 m, ca 8 m avstånd mellan TDR-paren) och B (längd ca 800 m, ca 12 m avstånd mellan TDR-paren, se figur 5), för att studera markvattenhaltens förändring över sommaren. Efter ett tag, föreslog jag att även grundvattennivån borde undersökas på dessa transekter, för att se om det fanns en koppling mellan förändring i markvattenhalt och grundvattennivå. Efter önskemål från Per-Erik Jansson om en detaljstudie av TDR, etablerades TDR-transekt E den 28 augusti (22,5 m lång, ca 50 cm avstånd mellan TDR-paren, se figur 7).

19 grundvattenrör och 4 peglar installerades längs de två transekterna (A och B) under tiden 18-20 juli enligt figur 6. Transekt A innehåller 6 rör och 1 pegel och transekt B 13 rör och 3 peglar. På grund av en rad praktiska orsaker (se nedan) så sattes alla grundvattenrören ner i lokala sänkor till ett djup som varierade mellan 95 och 127 cm, beroende på markens blockighet. Jag handborrade hål i marken för alla rör och vid behov så kompletteringsborrhades hålen (31/7-2/8) med s.k. Kobra bormaskin. Rören var vanliga PVC rör (PolyVinylChloride), 2,00 m långa med en yttre diameter på 32,0 mm och inre diameter på 28,0 mm. Slitsar sågades var 5:e cm, varannan slits var på "framsidan" och varannan på "baksidan". De försågs med en kraftig gummipropp i bottenändan innan röret slogs ner med en gummiklubba.

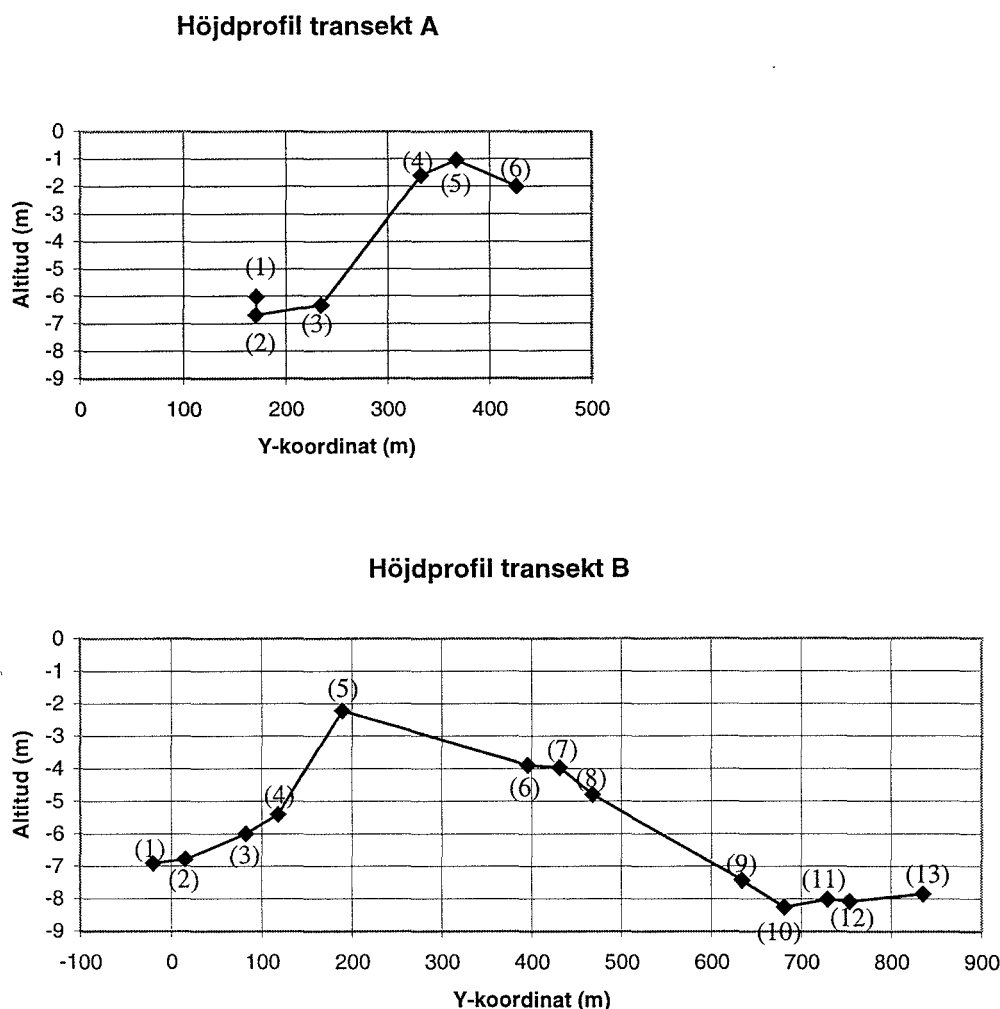


Figur 5. En karta över Norunda försöksområde och var det ligger. I nedre figuren är de tjocka linjerna skogsbilvägar. Kvadraterna är det unga resp det gamla beståndet, där flera detaljstudier har gjorts av andra forskare. De smala pilarna är transekterna. Transekt B fortsätter en bra bit bortanför yngre beståndet. Rutan P är en parkeringsplats. Den streckade rutan är transekt E där en detaljstudie utförts (se figur 7).

Grundvattenrören placerades enbart i sänkor. Den viktigaste orsaken var att erhålla vatten i rören trots att de enbart skulle borraras ner ca 1 meter ner i marken. Där var det heller inte så mycket stenar i marken, som på de högre belägna områdena. Det underlättade att finna lämpliga punkter där rören kunde nerböras. Vid installation av

stort antal TDR-givare, noterades att marken var mycket stenig. För att vara säker på att mätpunkten var tillräckligt stenfri sonderades först marken mycket noggrant med en sond, innan installation av rören skedde. Generellt för området noterades att blockigheten var något mindre tydlig i sänkorna än i övriga delar på försöksplatsen.

Alla rör avvägdes och dessutom noterade avståndet från markytan till rörets övre kant samt avståndet mellan rörkant och rörets botten. I vissa rör fick gummiproppens position justeras då det visade sig att den rört sig i uppåt.



Figur 6. Lägesposition för grundvattenrören i transekt A och B. Höjdangivelserna är efter en gemensam referens för alla rör. Notera att eventuella avvikelser i sidled, som i några fall har gjorts, inte är utmärkta i diagrammet. Siffrorna i parentes anger rörens nummer i transekten. Transekterna börjar vid masten (figur 5).

Ett annat problem var att vissa rör hade en stor förmåga att slamma igen och de fick slamsugas med jämna mellanrum. Slammängden mättes genom att sänka ner en 2 m aluminiumtumstock i grundvattenröret. Rören var speciellt utsatta när de var nyinstallerade, i några rör fanns det 50-60 cm slamlager i botten. Sedan de mest

slamfyllda rören blivit slamsugna för första gången höll de sig rena under hela mätperioden. Men andra rör fick slamsugas med jämna mellanrum.

Slamsugningen gick till på följande sätt. Först hällades 5-10 liter vatten ner i röret så att slammet löstes upp. Sedan fördes snabbt ner en slang, som var förbunden med en trycksäker E-kolv (Erlen-Mayer-kolv), i röret innan vattnet hann rinna undan. E-kolven var i sin tur förbunden med en manuell tensiometerpump så att ett kraftigt undertryck kunde appliceras i systemet, motsvarande 6-8 m.v.p., varpå det uppslammande vattnet sögs upp. När vattnet i E-kolven började bli klart släpptes tumstocken ner i röret. Var röret rent på slam studsade tumstocken på ett mycket karakteristisk sätt på gummiproppen. Uteblev studsens, innebar det att det fanns mera slam i grundvattenröret och hela proceduren fick upprepas.

Alla grundvattenrör mättes manuellt med ett s.k. blåsrör i mässing. Ett blåsrör är ett metallrör med ett "tvärflöjtshål" på sidan vid nedre ändan, botten igenpluggad och en "blåsslång" i andra ändan. Principen är att genom att blåsa i blåsröret samtidigt som "tvärflöjtshålet" sänks ner i vatten, bildas ett karakteristiskt bubblande ljud så fort "tvärflöjtshålets" nedre del kommer ner under vattenytan. Genom att gradera blåsröret (nollpunkten vid "tvärflöjtshålet"), fås grundvattendjupet ifrån grundvattenrörskanten på ett mycket smidigt sätt. Genom vetskap om hur mycket grundvattenröret sticker upp ovan jord, är det lätt att räkna ut grundvattendjupet under markytan.

Blåsröret var 1 cm i diameter och lite drygt 2 m långt. "Tvärflojtshålet" är i det nedre jacket sågat vinkelrätt mot rörets längdriktning ca 1/3-1/2 av diametern men det övre jacket lutar ca 45 grader upp från det nedre jacket. De bägge jacken möts inne i röret. Att blåsröret har plugg i nedre ändan är för att undvika att sättas igen av slam. "Blåsslangen" är ca 75 cm långt, i ett böjligt rörmaterial, med 20 cm långt styvt PVC-rör längst ut för att få god blåseffekt. Graderingen på blåsröret var i 5 cm steg men genom skattning visade sig att noggrannheten i blåsrörmätningarna låg på ca 1 cm.

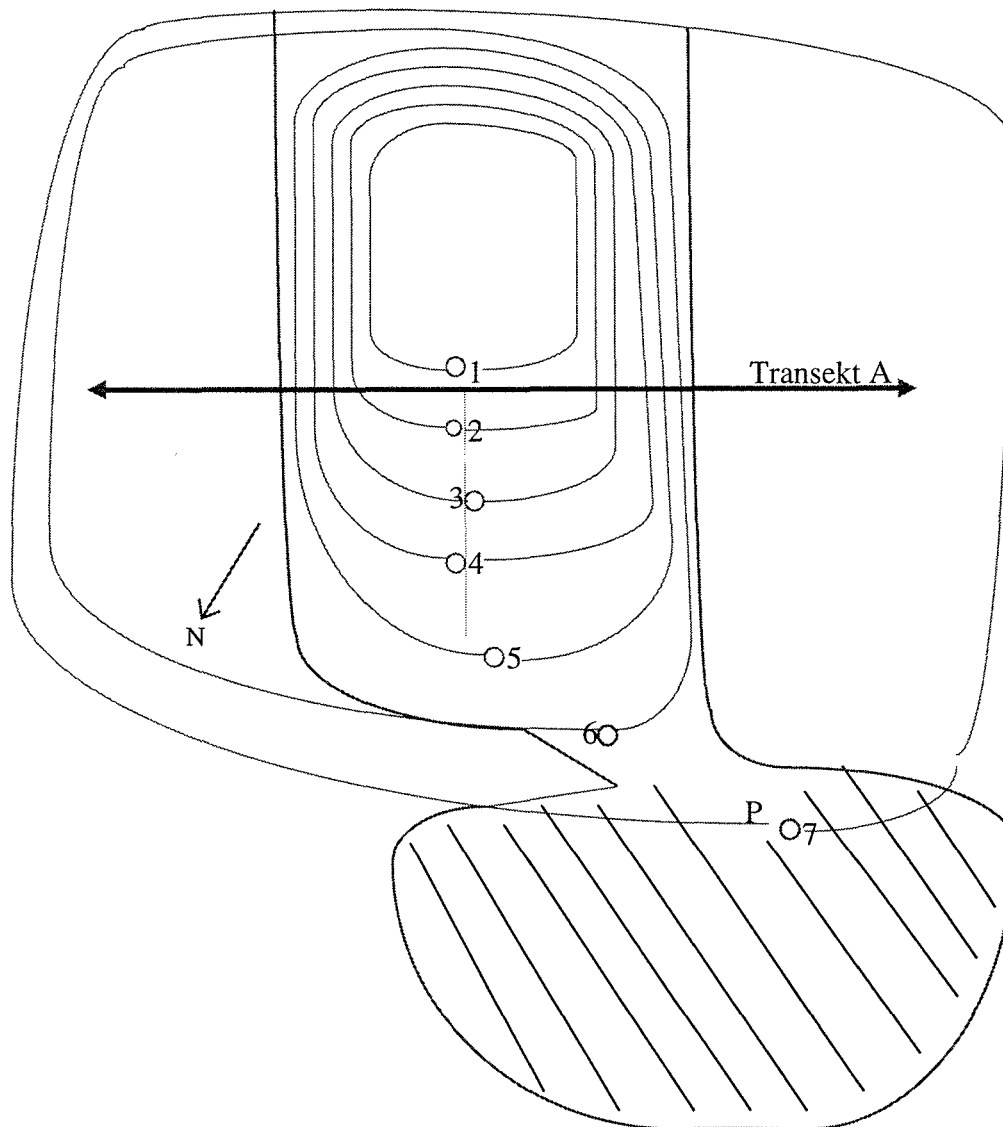
De manuella blåsrörmätningarna utförde jag under perioden 27/7-14/12 1995 med ca 1-3 veckors mellanrum mellan varje mätning.

2.3 Automatiska mätningar i en kortare transekt

Själva mätplatsen för de automatiska mätningarna (fig. 7-9) är nedre tredjedelen av en svag, ca. 1 m djup, sänka som sluttar 2,3 % mot ett litet kärr. Sluttningens botten består av klart finkornigare och blockfattigare material än omgivande marker vilket också ger platsen speciella hydrologiska egenskaper som inte riktigt är representativa för resten av området. Det avspeglar sig också på vegetationen som här innehåller mera gräs och ormbukar i fältskiktet samt s.k. gräsmossor (*Brachythecium* m.fl.) och stjärnmossor (*Mnium* m.fl.) i botten-skiktet.

Varje rör i transekterna A och B representerade, med några få undantag, ett "eget" avrinningsområde i mikroskala. Jag ville också detaljstudera grundvattenvariationen inom ett avrinningsområde i mikroskala. Längs transekt A fanns det en intressant sluttning där det redan satt två stycken grundvattenrör, en pegel och en TDR-transekt.

I nedre tredjedelen av sluttningen satte jag 2/10-1995 ut ytterligare 5 grundvattenrör i en transekt E enligt samma förfarande som innan (kompletteringsborrades den 4/10 och slamsögs 5/10). Avstånden mellan rören blev här bara ca 6-8 meter. I 6 utav dessa nu 7 rör i transekt E sattes tryckgivare som kopplades till en Campell-logger CR-10 WP. Rör 3 ansågs ha liknande hydrologiska förhållanden som rör 4 och den valdes sålunda bort.

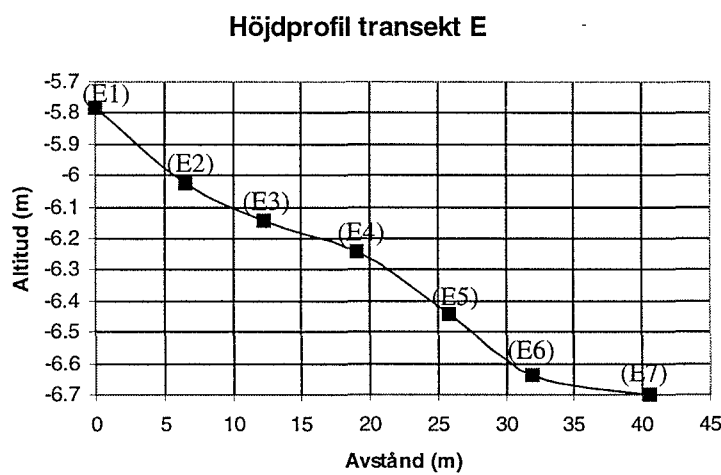


Figur 7. En detaljbild av transekt E. P är en Pegel och varje ring är ett grundvattenrör med den numrering som gäller i rapporten för E-transekten. Den streckade linjen mellan rör E1-E5 är en 22.38 m lång TDR-transekt. Linjerna är det tänkta avrinningsområdet för varje rör i grova drag. Det streckade området är det kärr som sänkan mynnar ut i.

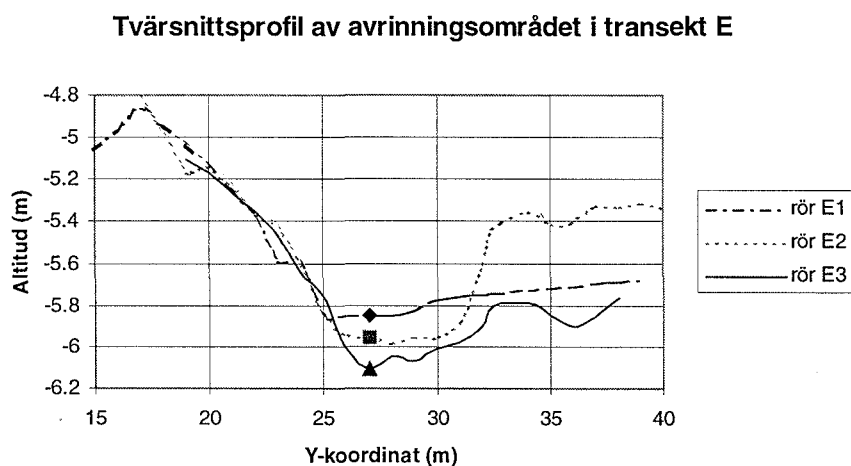
Tryckgivarna (WIKA typ 891.13.535) kalibrerades på labb genom att växelvis placera dessa längst ner i en cylinder fylld med ca 1 m vattenpelare och en punkt motsvarande lufttryck till de visade rätta värden. Varje tryckgivare hade ett eget offset och en egen

“tryckkoefficient” enligt räta linjens ekvation (“visat värde = offset + deltetryck * tryckkonstant”). Det fanns inte tid att göra dessa kalibreringar under fältförhållanden men det visade sig, genom kontrollmätningar med blåsrör, att tryckgivarna var relativt okänsliga för de temperaturskillnader, och andra faktorer, som kan skilja mellan labb och fältförhållanden.

Tryckgivarna sattes ut 26/10 1995 och mätningarna pågick till 14/12 1995 med undantag av 3-9/11 1995 p.g.a. olyckliga omständigheter (kortslutning vid batteribyte och därefter “den stora snöstormen”). Loggern tömdes på mätdata med jämna mellanrum med en bärbar PC.



Figur 8. Lägesposition för grundvattenrören i transekt E. Höjdangivelserna är efter en gemensam referens för alla rör. Markeringarna inom parentes visar var respektive rör sitter.



Figur 9. Höjdprofil för markytan vid rör E1, E2 respektive E3 vinkelrätt mot transektriktningen. Markörerna i figuren är rören.

2.4 Statistik för analys av variationsmönster

För att beskriva i vilken grad samvariation förekom mellan olika punkter i terrängen genomfördes en korrelationsanalys med hjälp av datorprogrammet Microsoft Excel 7.0. Dels jämfördes korrelationen mellan mätserierna för olika rör och dels jämfördes korrelationen mellan olika mättidpunkter. Rören jämfördes både inom samma transekt och mellan olika transekter. Enstaka torra observationer behandlades som så att de gavs ett hypotetiskt värde som låg 2,5 cm lägre än vad som var möjligt att avläsa. Annars skulle de statistiska resultaten bli betydligt mera svåranalyserade. Rör som var genomgående torra ströks ur behandlingen. Korrelationsjämförelser gjordes alltid parvis. Alla rör jämfördes med varandra och alla mättidpunkter jämfördes med varandra.

Korrelationen mellan olika rör undersöktes dels för hela mätperioden 27/7-14/12 (14 observationer) och dels för två delperioder (27/7-29/9 och 5/10-14/12) med 7 observationer i varje delperiod. Uppdelningen i delperioder gjordes för att bättre kunna jämföra transekt A och B med transekt E (som bara undersöktes under den senare delperioden). Dessutom kan eventuella skillnader som beror på tiden påvisas.

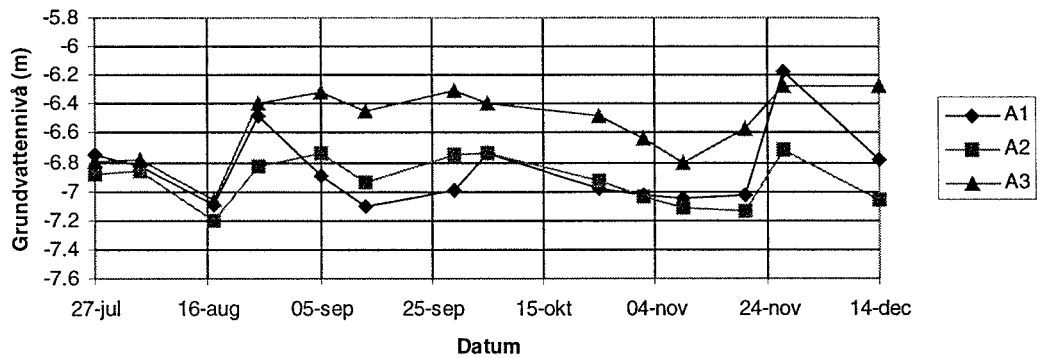
3. RESULTAT OCH DISKUSSION

3.1 Variationsmönster mellan olika transekter under en femmånadersperiod

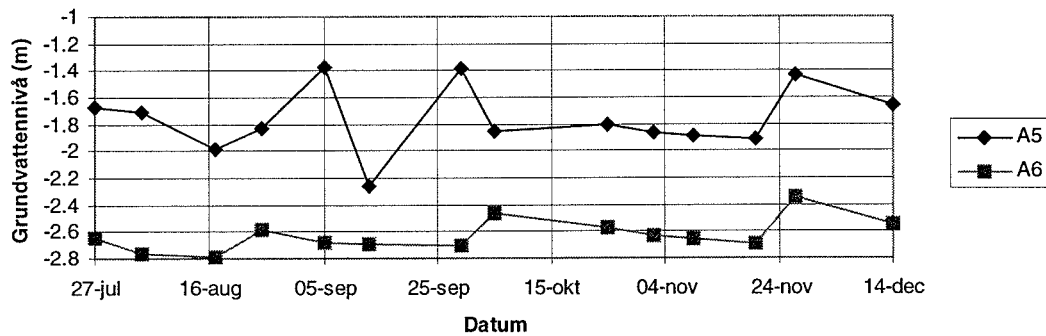
Grundvattenytans läge varierade med tiden på ett mer eller mindre samstämmigt sätt mellan de olika platserna i transekterna (fig. 10-12). I samtliga rör stiger grundvattnet tydligt mellan den 20 november till den 27 november för att sedan avta. Stigningen är svag i rör B3 och rör A3 hinner frysa innan den sista observationen görs och isytan hamnar på samma nivå som vid föregående avläsning. De flesta rör ger en svag och jämn grundvattensänkning mellan 25 oktober och 20 november.

Samstämmigheten i tidsvariation var störst i transekt E. För transekt A och B förekom det platser med stora skillnader i dynamik och variationsbredd. Korrelationerna mellan olika rör inom samma transekt visas i figur 13-15 för hela mätperioden. De ger ett mycket intressant resultat som väl belyser komplexiteten i grundvattnets rörelser och fluktuationer. Det är uppenbart att det inte bara är avståndet mellan rören som har betydelse. Man måste också noggrant jämföra skillnaderna i markegenskaper och rörens läge i mikroavrinningsområdet. Det märks särskilt väl i transekt B som är så lång. Korrelationen för hela mätperioden 27/7-14/12 är t.ex. relativt god mellan rör B1 och B13 ($r=0,75$), trots att det är över 800 m mellan rören men korrelationen mellan de näraliggande (ca 50 m avstånd) rören B1 och B3 är mycket svag ($r=0,14$).

Vid det äldre beståndet.

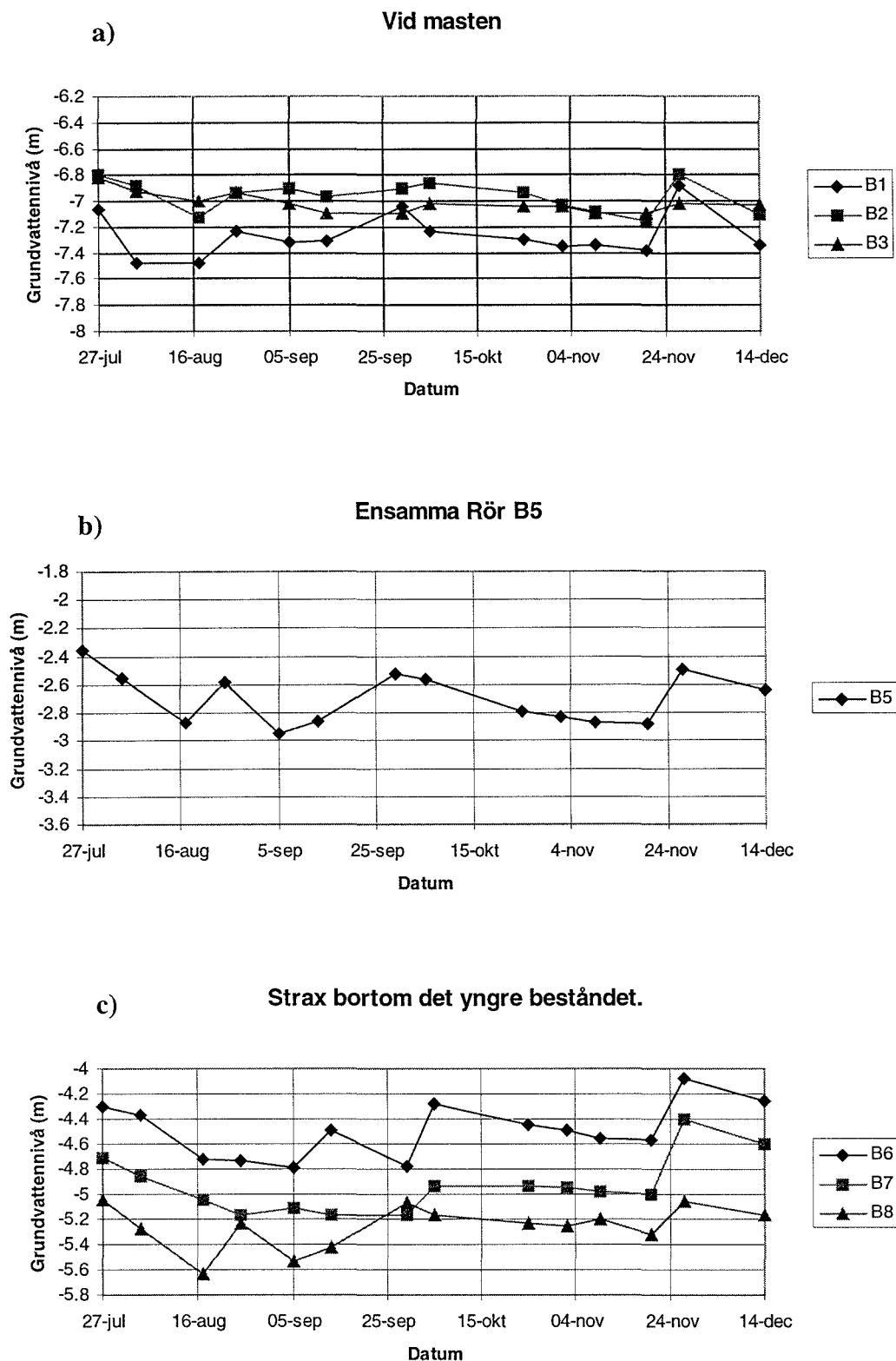


Bortom vägen.

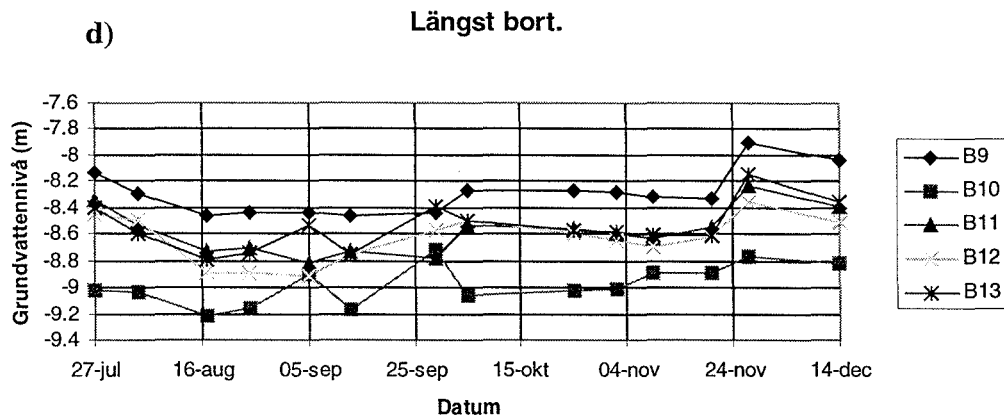


Figur 10. Grundvattenytans variation med tiden i transekt A (gemensam referens i alla rör). Notera att rör A4 saknas p.g.a. få mätvärden. Rör A1 är samma rör som rör E2 och att rör A2 är samma rör som rör E7.

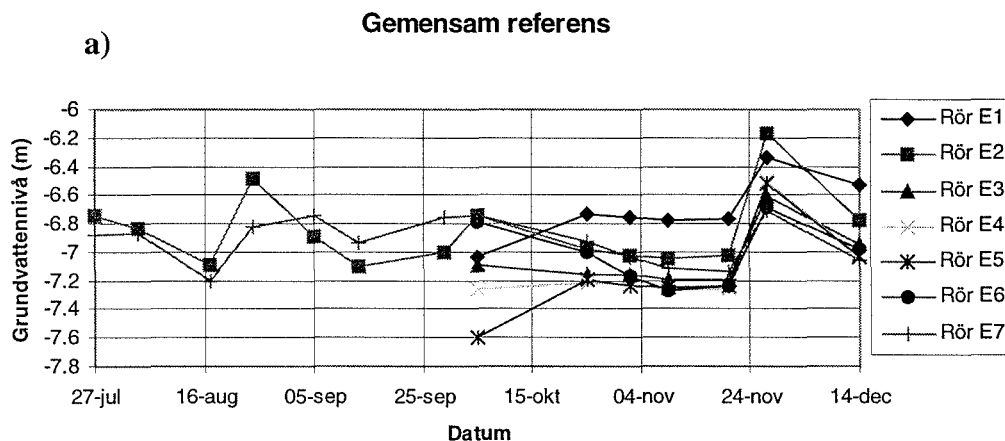
Korrelationen är mycket god mellan rör B9 och rör B7 ($r=0,98$), mellan rör B7 och B11 ($r=0,94$) och mellan rör B9 och B11 ($r=0,96$). Korrelationen är också ganska god mellan rör B6 och B7 ($r=0,87$), rör B6 och B9 ($r=0,89$) och mellan rör B6 och B11 ($r=0,91$). Däremot är korrelationen mellan rör B10 och ovannämnda rör svag t.ex. mellan rör B10 och B11 ($r=0,31$) och mellan rör B10 och B6 ($r=0,18$). Korrelationen mellan rör B3 och B10 är t.o.m. negativ ($r=0,34$) vilket är ganska förvånande.



Figur 11a-c. Grundvattenytans variation med tiden i transekt B för rör B1-B8 (gemensam referens i alla rör). Notera att rör B4 valdes bort p.g.a. att inga mätningar erhöles från det röret.

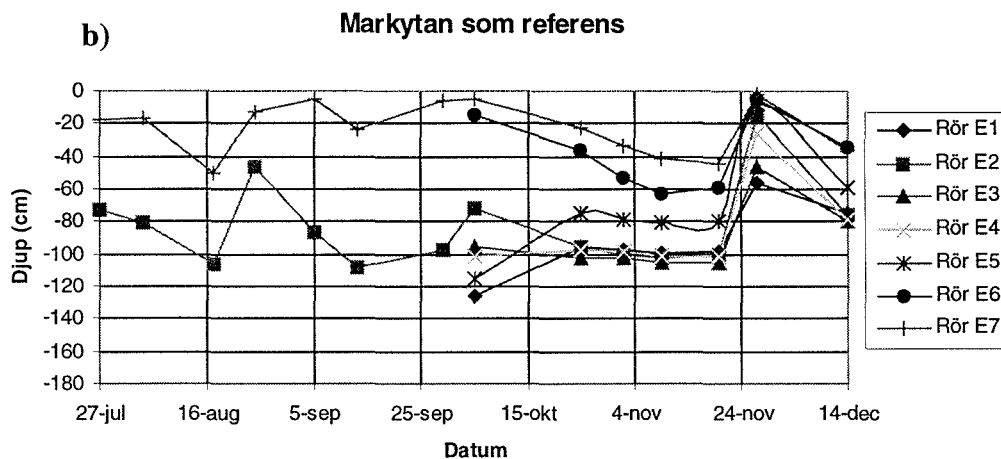


Figur 11d. Grundvattenytans variation med tiden i transekt B rör B9-B13 (gemensam referens i alla rör).



Figur 12a. Grundvattenytans variation med tiden i transekt E (gemensam referens i alla rör). Notera att rör E2 och rör E7 även ingår i transekt A som rör A1 och rör A2 respektive, därav de längre mätserierna för just dessa två rör.

Inom transekt A är det noterbart att korrelationen mellan rör A1 och A6 är hyfsad god ($r=0,76$). Korrelationen mellan rör A1/E2 och A3 ökar avsevärt (från $r=0,63$ till $r=0,77$) om man räknar bort den sista observationen (14/12) då rör A3 var frusen. Grundvattnet i rör A2/E7 sjönk 35 cm under perioden 27/11-14/12.



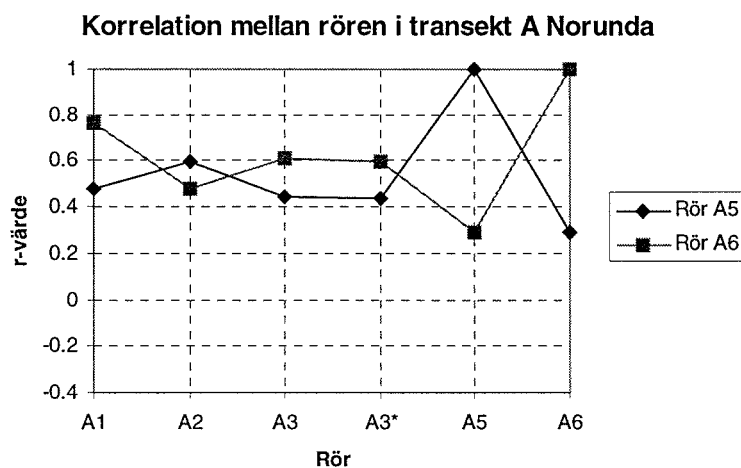
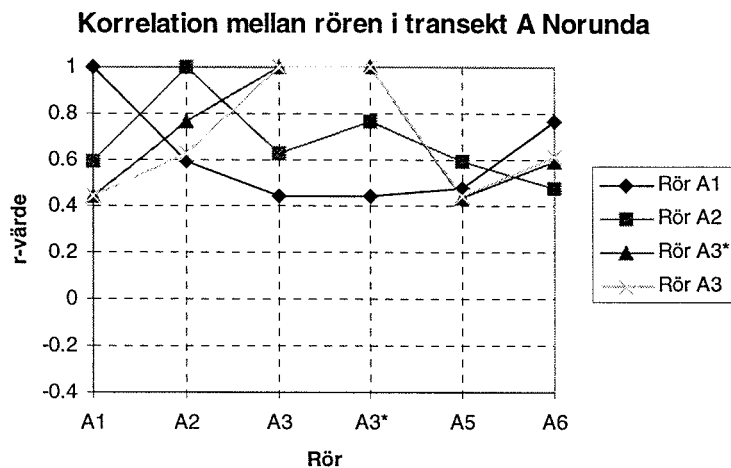
Figur 12b. Grundvattenytans variation med tiden i transekt E (markytan som referens). Notera att rör E2 och rör E7 även ingår i transekt A som rör A1 och rör A2 respektive, därav de längre mätserierna för just dessa två rör.

Variationerna inom transekt E (figur 15) är betydligt större än vad jag trodde. Sålunda är korrelationen mycket låg mellan rör E1 och E7/A2 ($r=0,10$) och mellan rör E1 och E6 ($r=0,30$). Överlag har rör E6 och E7/A2 relativt låg korrelation med de övriga rören (utom rör E2) men god korrelation mellan varandra ($r=0,93$). Det kan nog delvis förklaras av att rören har annorlunda tillrinningsområden (se figur 7) samt har annorlunda hydrologiska egenskaper än övriga rör i transekt E.

Det var också god korrelation mellan rör E4 och E5 ($r=0,92$).

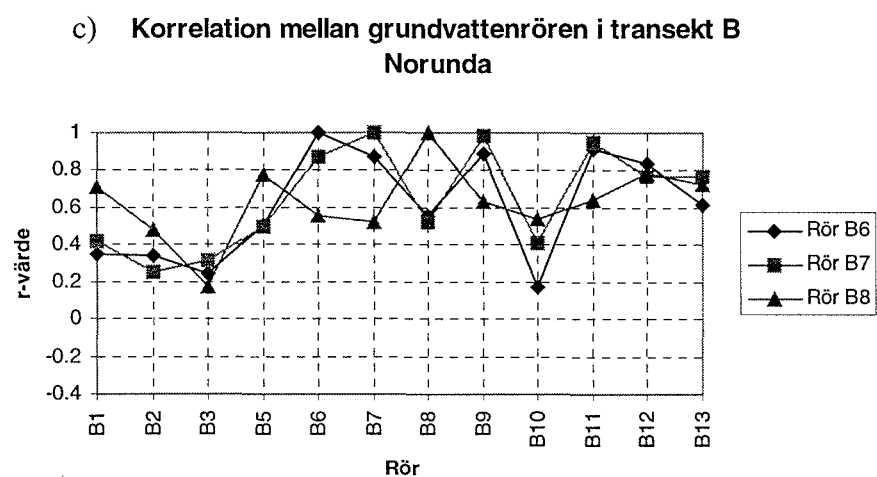
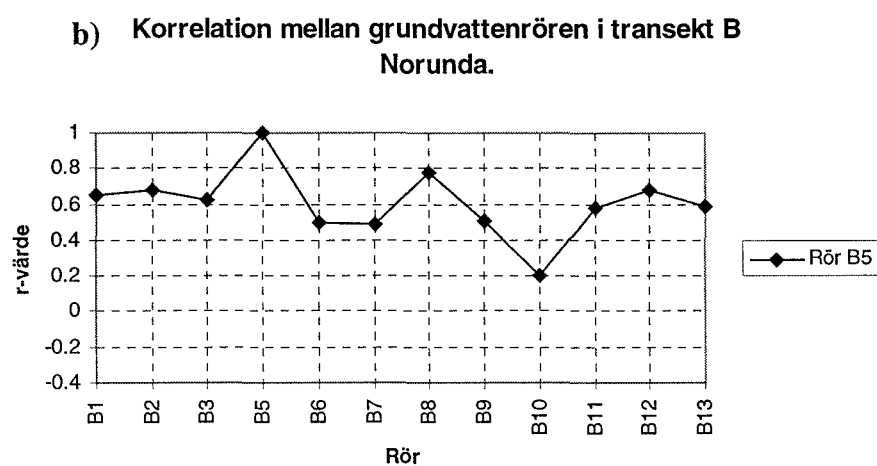
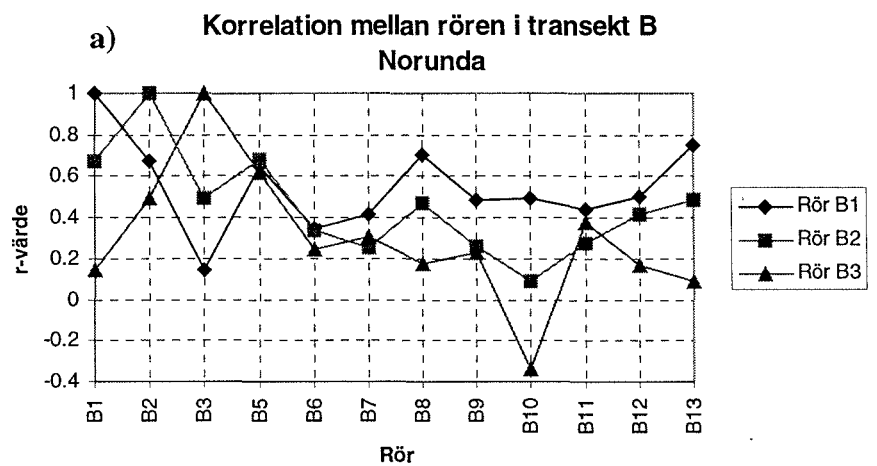
Rör E1 och E5 har mycket god korrelation ($r=0,98$) och avståndet är 25,8 m. Rör E1 och E4 har god korrelation ($r=0,86$). Däremot har rör E1 och E2/A1 ganska dålig korrelation ($r=0,63$) trots att de sitter bara ca 6,5 m från varandra. Korrelationen är ännu sämre mellan rör E5 och rör E6 ($r=0,39$) trots att avståndet mellan rören bara är 6,1 m. Rör E6 har en del lera i botten som är överlagrad med torv men rör E5 har grövre struktur och mindre mullager.

Korrelationen var mycket god mellan rör E3 och E4 ($r=0,98$) vilket indikerar att det var ett bra val att välja bort E3 när jag hade 6 tryckgivare och 7 grundvattenrör. Korrelationen var också mycket god mellan rör E2/A1 och E3 ($r=0,97$) och mellan E2/A1 och E4 ($r=0,93$). Det tyder på att Rör E2-E4 har liknande tillrinningsområden och liknande markegenskaper.

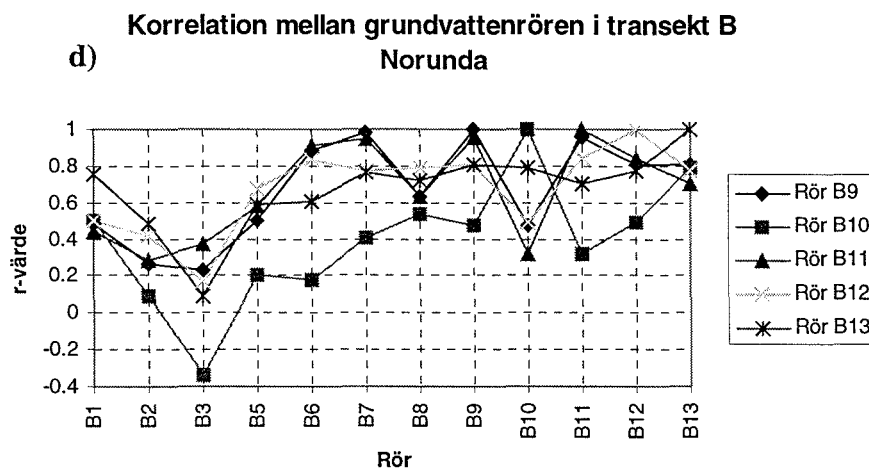


Figur 13. Korrelationskoefficienten mellan de olika rören i transekt A under perioden 27/7-14/12 1995. Notera att A3* är den sista observationen struken från rör A3.

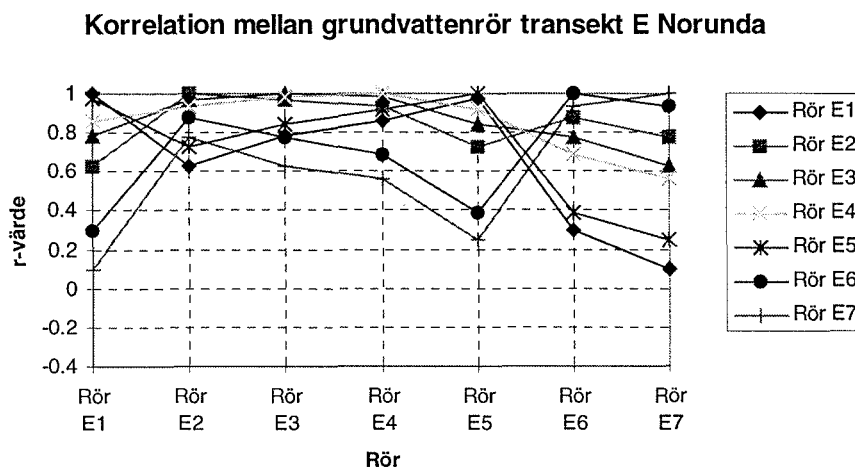
Generellt noterades att korrelationen mellan de olika rören i transekt A och B var betydligt starkare i den senare halvan av mätperioden än den tidigare men vissa undantag finns (Appendix 1-3). Det kan bero på att evapotranspirationen är betydligt lägre under den andra perioden (ca 13 mm) än för den första perioden (ca 135 mm) beroende på kallare väderlek och eventuella effekter av olika vegetation "suddas ut". En väsentlig del i förklaringen är också effekterna av snösmältningen under den milda perioden (23-27 november) då alla rör visade en tydlig höjning av grundvattennivån och den påföljande köldperioden då alla rör visade en mer eller mindre tydlig sänkning av grundvattenytan. En stor variationsbredd ger normalt en hög korrelation medan en liten variationsbredd ger en låg korrelation.



Figur 14a-c. Korrelationskoefficienten mellan rör B1-B8 (B4 struken) och alla rör inom transekt B under perioden 27/7-14/12 1995.



Figur 14d. Korrelationskoefficienten mellan rör B9-B13 och alla rör inom transekt B under perioden 27/7-14/12 1995.



Figur 15. Korrelationskoefficienterna mellan de olika rören i transekt E under tiden 5/10-14/12.

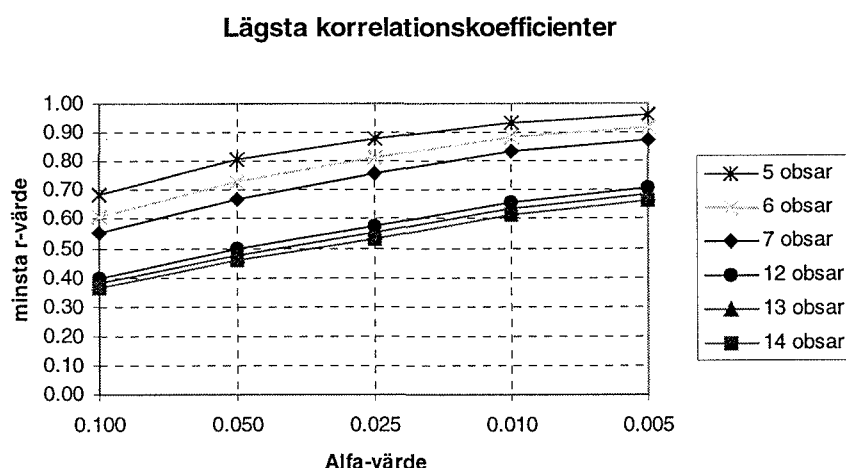
Det var dock några rörkombinationer där korrelationen faktiskt sjönk under den andra halvan av mätperioden jämfört med den första. Särskilt rör B2 och rör B10 har många rörkombinationer med denna tendens. Rör B10 sitter nere i ett grävt dike. Rör B2 sitter mitt ute i ett relativt stort kärr med hög lerhalt i botten. Jag har ingen bra förklaring varför just dessa rör avviker frekvent från mängden.

De rör som visade sig vara mycket väl korrelerade under alla jämförelser visas i tabell 1. Genom Student t-test prövas om hypotesen "ingen korrelation föreligger mellan två rör" kan förkastas eller ej. De krav som krävs för att förkasta denna hypotes syns i figur 16.

Tabell 1. De rörpar som var signifikant korrelerade med varandra för hela mätperioden (27/7-14/12 1995) och för de två delmätperioderna (27/7-29/9 och 5/10-14/12) separat.

Korrelation mellan dessa rör med:

Högsta säkerhet ($\alpha < 0.005$)				Näst högsta säkerhet ($0.01 < \alpha < 0.005$)
B5-B8	B7-B9	B9-B7	B11-B6	A2-A3*
	B7-B11	B9-B11	B11-B7	
B6-B11			B11-B9	A3*-A2
	B8-B5			

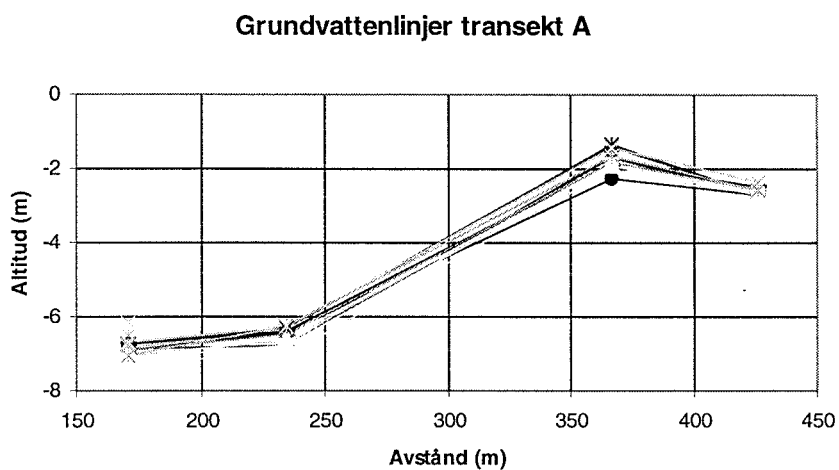


Figur 16. Krav på korrelationskoefficient för att man ska kunna förkasta antagandet att ingen korrelations föreligger. Ligger r-värdet över linjen kan hypotesen, att det inte finns någon korrelation mellan grundvattenrören, förkastas. Ju lägre α -värde, ju högre säkerhet är det om nollhypotesen förkastas. Notera att för rör A3* gjordes det 6 respektive 13 avläsningar.

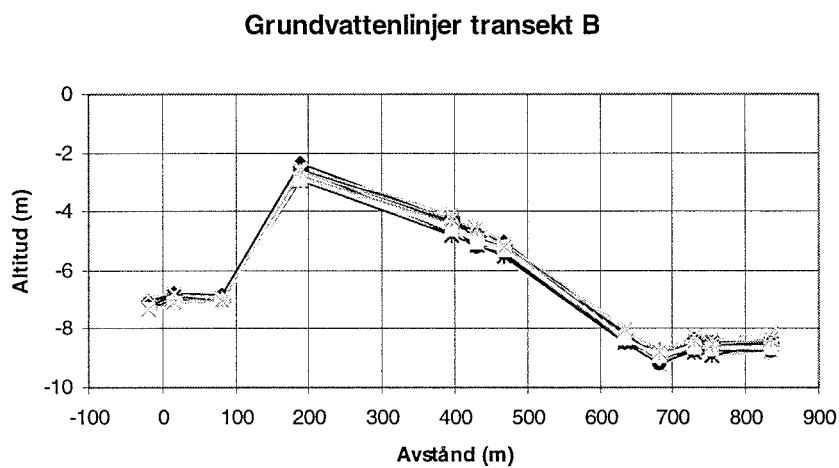
Grundvattenlinjernas utseende för varje transekt undersöktes också för att se om det fanns några skillnader mellan de olika mätpunkterna. De visas i detalj i figur 17-19. Grundvattenlinjerna följer i stort samma mönster som markytan för transekt A och B. Den relativt stora variationen i markytans höjd nivå relativt de små variationer i grundvattenytans nivå gör det svårt att dra några slutsatser för transekt A och transekt B.

I transekt E ser man en tydlig konkav "båge" med lägsta punkt runt rör E4, som inte stämmer överrens med markytan mellan 25/10-20/11. Det kan stärka misstankarna

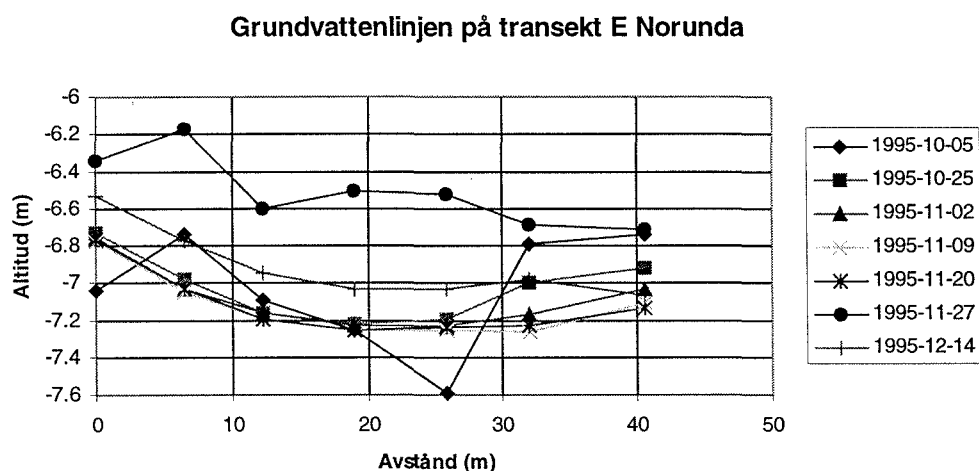
om att rör E6 och E7 påverkas även från större avrinningsområden än övriga rör i transekten (figur 7) som då pressar upp grundvattennivån i rör E6 och E7.



Figur 17. Grundvattenlinjerna i transekt A med gemensam referensnivå under hela mätperioden



Figur 18. Grundvattenlinjerna i transekt B med gemensam referensnivå under hela mätperioden

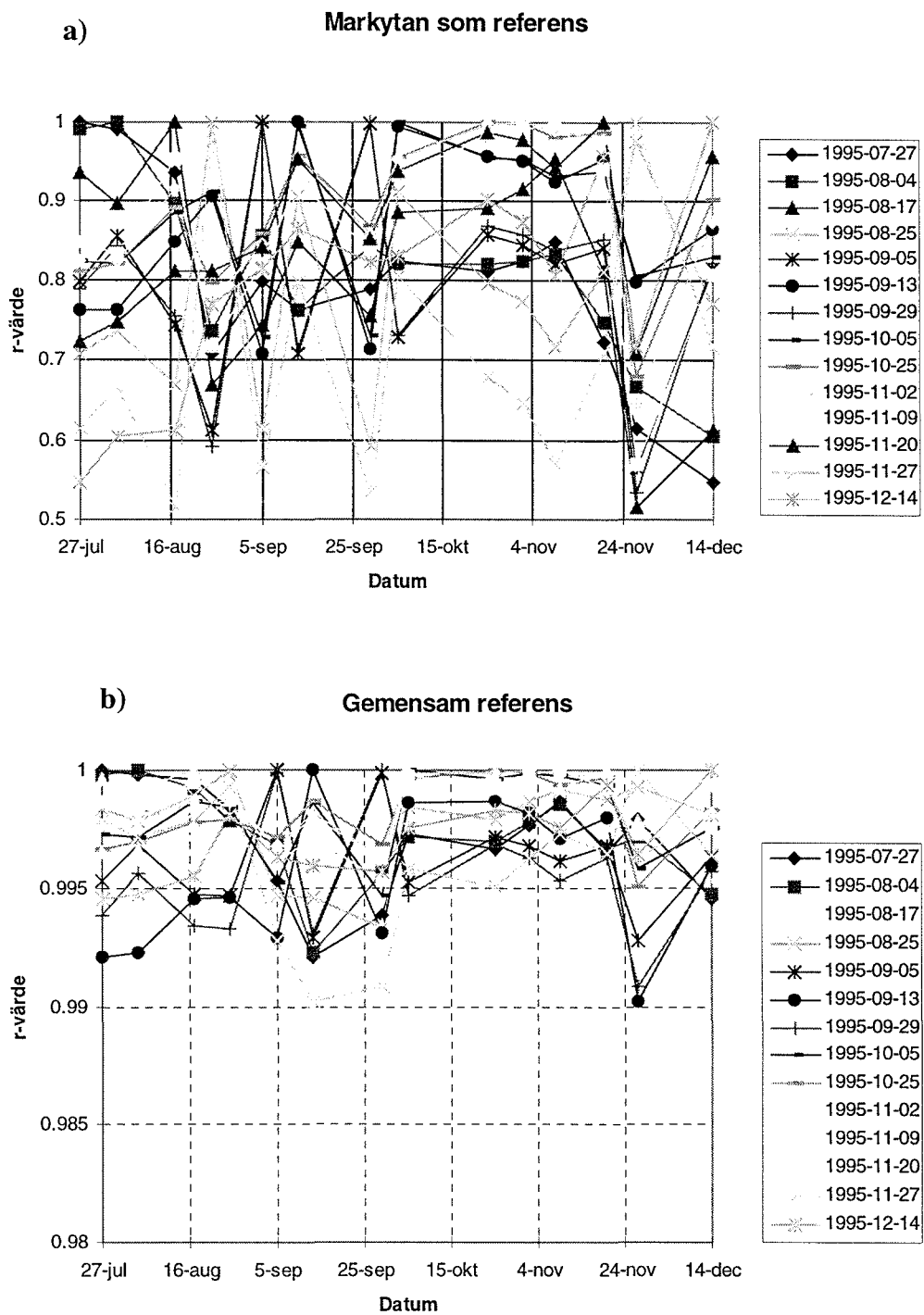


Figur 19. Grundvattenlinjen i transekt E relativt en gemensam referenspunkt vid 7 olika mättillfällen under den senare delen av mätperioden.

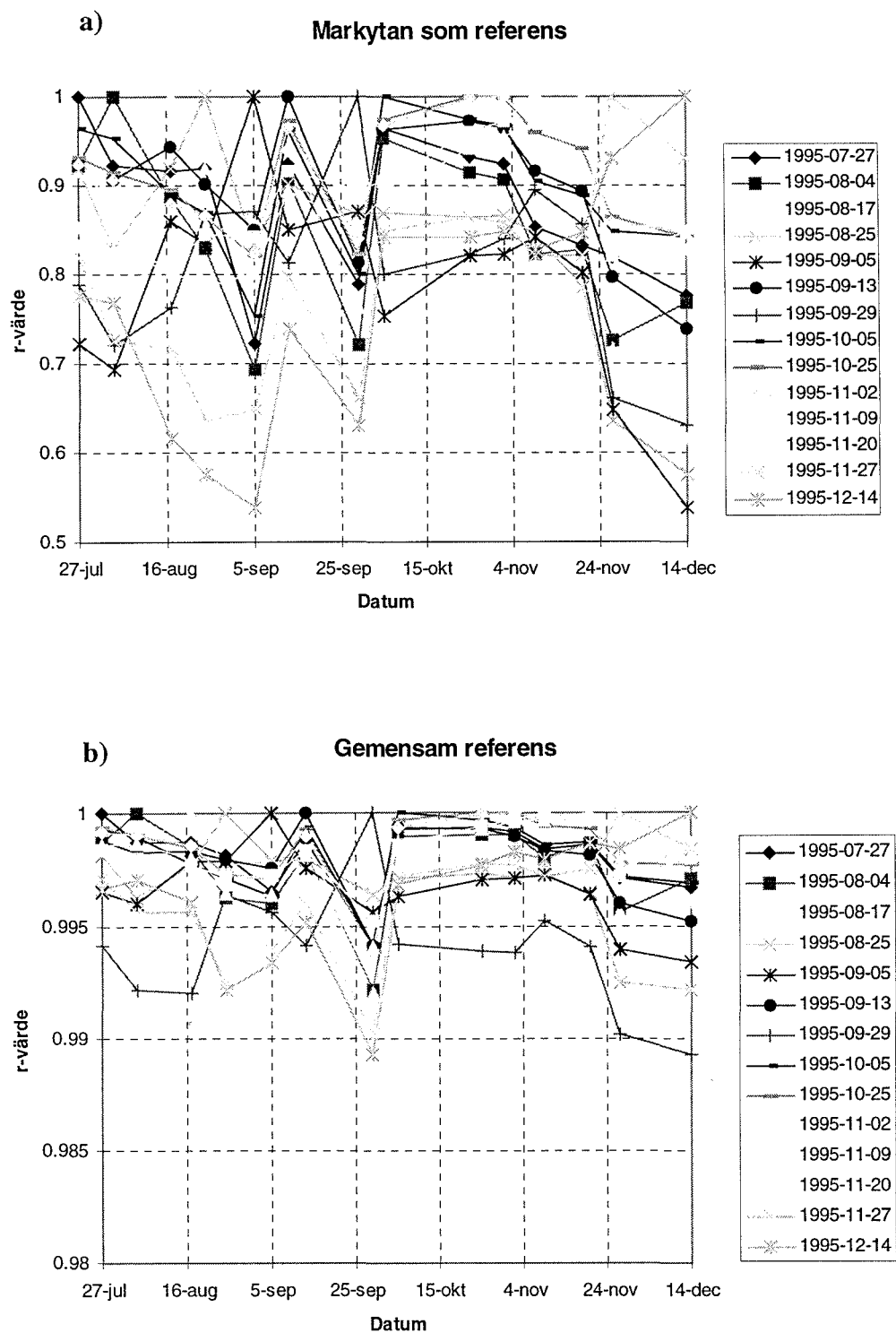
Korrelationen mellan vattenlinjerna mellan olika tidpunkter var genomgående hög. De visas i figur 20-22. Det märks att den 27/11, då grundvattnet steg tydligt, har låg korrelation mot de övriga mättidpunkterna på alla transekter. Det framgår också att perioden 25/10-20/11 är mycket välkorrelerade med varandra. En väntad (men svag) tendens är att korrelationen mellan näraliggande mättidpunkter är generellt högre än om mättidpunkterna ligger långt ifrån varandra. Det finns dock gott om undantag i min mätserie, t.ex. är 5 september välkorrelerad med 29 september men båda mättidpunkterna är relativt svagt korrelerad med 13 september.

Det är värt att notera att korrelationskoefficienten (r) är betydligt högre om man räknar korrelationen med "absolutnivåer" relativt en fix (här kallad grundvattenlinjer) eller om man beräknar den relativt markytan. Är skillnaderna i markytans nivå betydligt större än skillnaderna mellan grundvattenytans förändring mellan olika mättidpunkter (som är fallet i transekt A och transekt B erhålls automatiskt en hög korrelation. För transekt E är däremot skillnaderna i markytans läge mindre och en lägre korrelation erhålls.

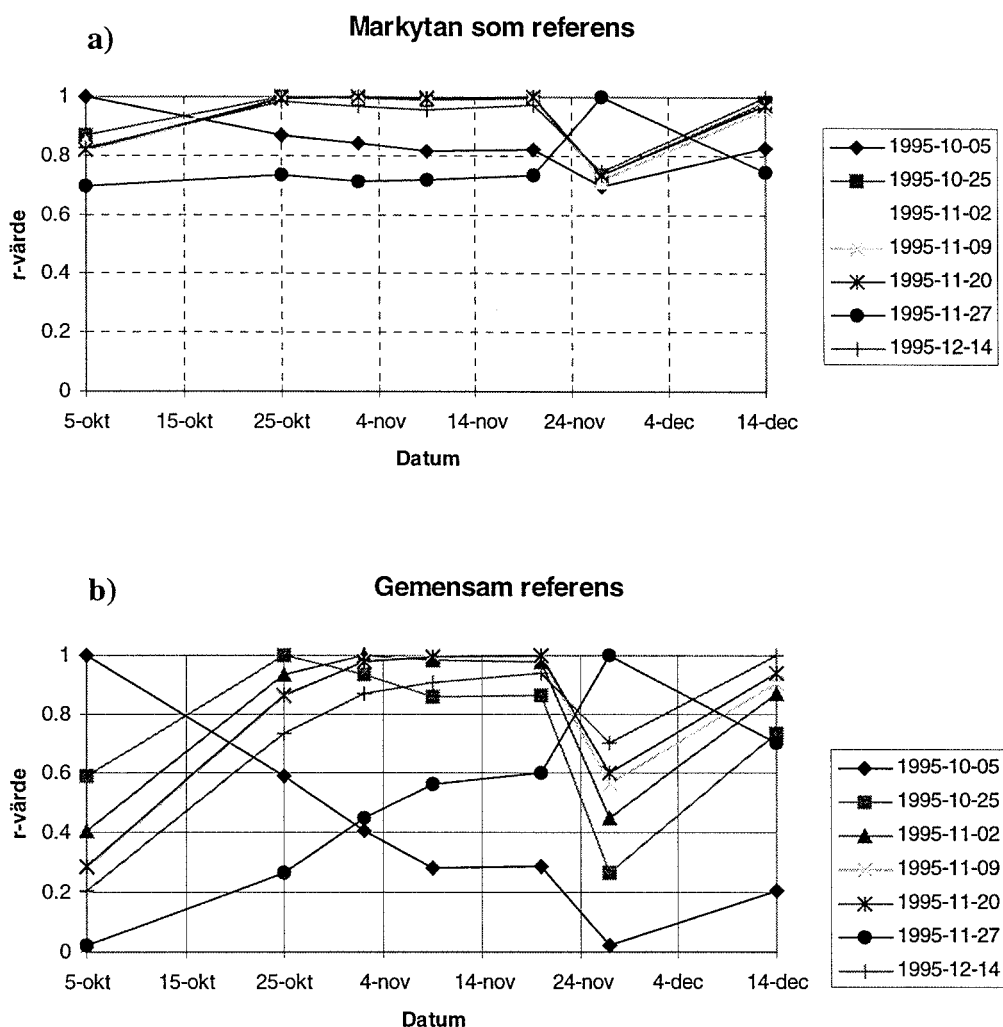
Det är också viktigt att komma ihåg att god korrelation mellan två rör eller mellan två mätdatum innebär att de har liknande mönster i grundvattenkurva. Det kan ju skilja mycket i grundvattennivå mellan två rör eller två olika mätdatum. Är mönstret det samma erhålls en god korrelation. Är mönstret olika blir korrelationen låg. Variationsbredden ("standardavvikelsen") är också viktig. Låg variationsbredd ger ofta låg korrelation och stor (och samstämmig!) variationsbredd ger hög korrelation. Detta belyses mer än väl med korrelationen mellan olika vattenlinjer med gemensam referensnivå respektive markytan som referensnivå i transekt A och B (se fig 20-21).



Figur 20. Korrelation med grundvattenlinjerna i transekt A mellan olika tidsperioder. Med markytan som referens (a) och med gemensam referens (b).



Figur 21. Korrelation med grundvattenlinjerna i transekt B mellan olika tidsperioder. Med markytan som referens (a) och med gemensam referens (b).

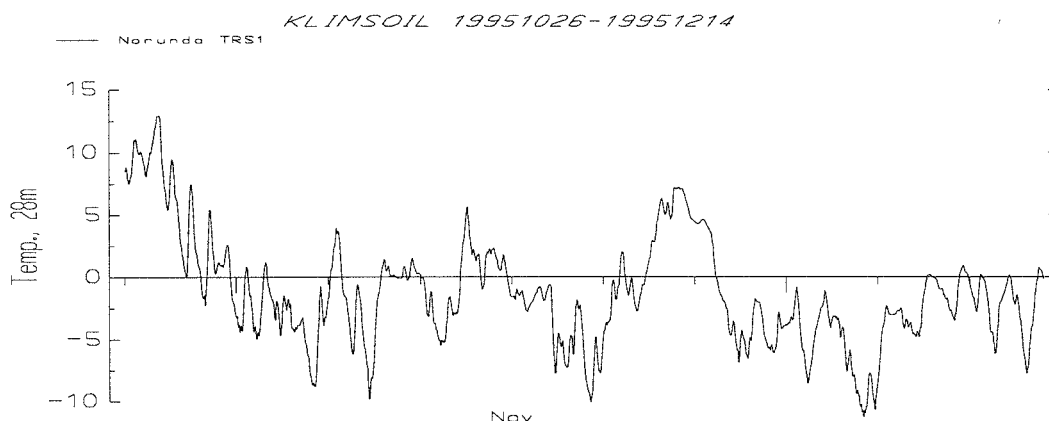


Figur 22. Korrelation med grundvattenlinjerna i transekt E mellan olika tidsperioder. Med markytan som referens (a) och med gemensam referens (b).

Man måste också ifrågasätta de enskilda mätdatumets effekter på resultatet. Hur mycket gör skillnader i mättidpunkt på några dagar fram eller bak på resultatet och den statistiska beräkningarna? Det är ju förstås omöjligt att ge ett komplett och enhetligt svar men analyserar man kurvorna för de olika vattenlinjen och de olika rören noteras att några rör "åker upp och ner som en jojo" i mätserien medan andra rör verkar relativt opåverkade. Det behöver ju inte enbart bero på skillnader i markens hydrologiska egenskaper utan även bero på just de tidpunkter som mätpunkten utfördes på. Rent hypotetiskt skulle en kraftig regnskur hinna påverka vissa rör men inte andra rör vid mättillfället. Skulle mättidpunkten ske någon dag senare skulle kanske samtliga rör hinna påverkas och resultatet då bli annorlunda. För så långa transekter som transekt A och framförallt transekt B kan en lokal åbskur variera i intensitet över transekten och då påverka vissa rör betydligt mer än andra.

3.2 Detaljerade variationsmönster i ett litet delområde

Under mätperioden (26/10-14/12) var vädret först milt för att efter “den stora snöstormen”, 3/11 1995, med ca 2 dm snötäcke var det ganska kallt fram till den 23/11 -95 då en kort, men intensiv, värmebölja fick all snö att smälta. Från 27/11-95 blev det mycket kallt under resterande mätperioden (figur 23). Det var dock en kortare mildperiod 13-15/11 som påverkade främst rör E6 och rör E7.



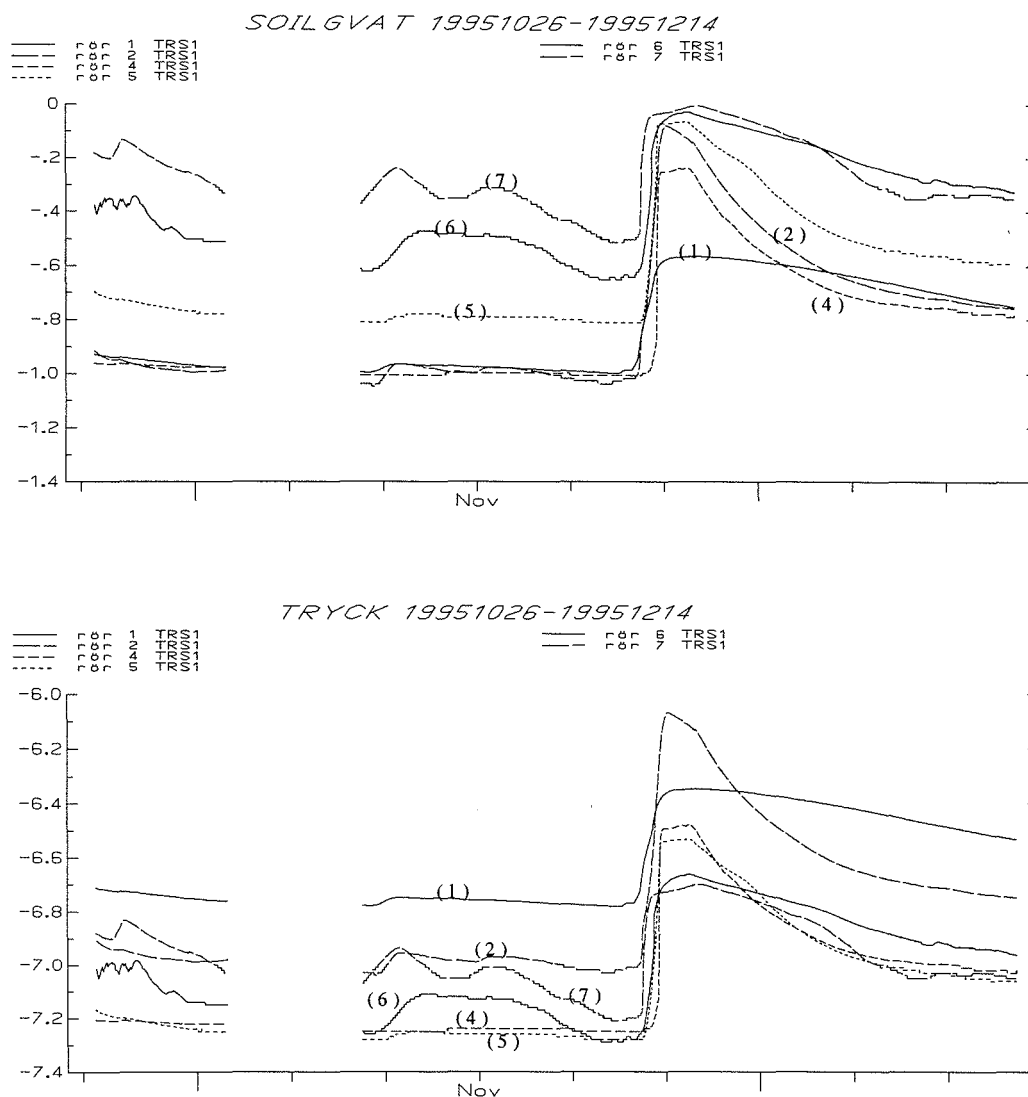
Figur 23. Temperaturförhållanden på Norunda under mätperioden för de intensiva mätningarna (26/10-14/12 1995).

Vid jämna tidpunkter kontrollerades tryckgivarna mot manuella blåsrörmätningar. De visade genomgående en god överensstämmelse och den maximala avvikelserna var högst 1,8 cm under hela mätperioden.

Alla rör ger mycket tydlig respons för den kraftiga värmeperiod som varade mellan den 23-27 november (se figur 24 och appendix 4). Speciellt i rör E2 var responsen mycket tydlig. Där steg grundvattenytan närmare 0,9 m på en dag. De kortare värmeperioderna ger ett klart utslag i de två grundvattenrören längst ner (rör E6 och rör E7) medan resten av grundvattenrören är tämligen opåverkade. Dessa två rör visade sig överlag vara mycket känsliga för små värmeperioder, men de ger mindre respons för den stora grundvattentoppen än de andra rören beroendes på att de kommer upp i lager nära markytan med hög hydraulisk konduktivitet och hög effektiv porositet.

Under den kalla perioden från den 27 november sjönk grundvattennivån i alla rören. I rör E1 och rör E6 var avklingningen mycket flack och den var mera tydlig i de övriga rören. I samtliga fall var grundvattennivån 1,5-3 dm högre vid mätseriens avslutande den 14 december än när den stora stigningen inträffade.

Rör E4 och rör E5 hade mycket lika grundvattenförlopp, speciellt om jag korrigerar för höjdskillnaderna. Den största skillnaden mellan rören är i förloppet innan "den stora snöstormen".

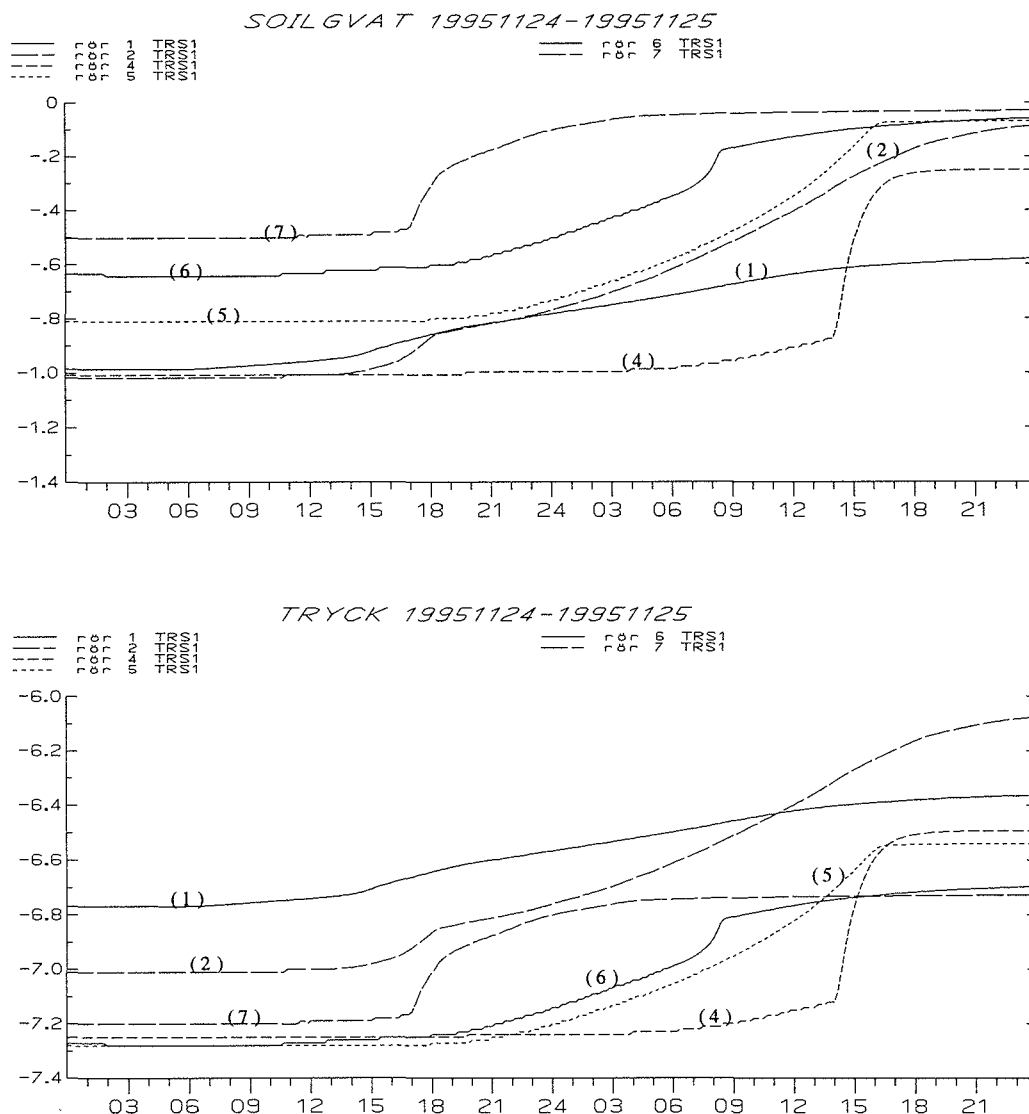


Figur 24. Resultatet av de automatiska grundvattenmätningarna 26/10-14/12 1995. Den övre delfiguren är grundvattenytans nivå relativt markytan och den nedre relativt en gemensam referensnivå. Siffrorna i parentes anger vilket rör som kurvan kommer ifrån.

Det framgår tydligt att varje rör ger en mycket individuell respons vilket förmodligen innebär att varje rör i transekten sitter på mark med "unika" hydrologiska egenskaper såväl som att de sitter på olika plats i avrinningsområdet. Speciellt rör E6 och rör E7 sitter i depressioner med mycket lera överlagrad med torv vilket ger stor respons p.g.a. små ändringar i vattenhalten, beroende på låg effektiv porositet i djupare marklager.

Marken kring rör E2 har förmodligen en ganska fin kornstruktur vilket skulle kunna vara en förklaring till den kraftiga responsen och avklingning som sker. Speciellt rör E1 men även rör E4 och rör E5 sitter förmodligen i relativt grovkorniga jordar (för transekten) vilket skulle kunna förklara dess relativa okänslighet.

Den uppförstoring av den stora grundvattenstigningen 24-25 november (figur 25) ger en intressant inblick i grundvattnets respons i både tid och rum. Rör E7 stiger snabbt i början men när vattnet närmar sig markytan avklingar stigningen precis enligt min tankemodell p.g.a. att grundvattenytan kommer upp i lager med hög porositet och därmed högre konduktivitet. Rör E1 börjar visserligen stiga tidigt men stigningen är långsam, beroende på hög effektiv porositet.



Figur 25. Förändringarna vid grundvattennivån under 24 och 25 november 1995 då den stora grundvattenstigningen inträffade. Den övre delfiguren är grundvattenytans nivå relativt markytan och den nedre relativt en gemensam referensnivå. Siffrorna i parentes anger vilket rör som kurvan kommer ifrån.

Rör E4 stämmer inte med min tankemodell. Först en svag och långsam stigning med ca 7-8 cm för att sedan "explodera" med ca 65 cm på bara 1-2 timmar innan stigningen klingar av helt. Värt att notera är också att E4 reagerar betydligt senare än de andra rören. Det kan tyda på att det finns ett kraftigt skikt med mycket fint porsystem mellan 30-90 cm som dels försenar perkolationen ner till grundvattnet och som skulle kunna förklara den kraftiga responsen sedan när grundvattnet väl når botten på detta skikt. Det finns dock en faktor som kan ge en annan förklaring. Enligt figur 17 verkar grundvattennivån vara lägst absolutnivå i detta rör vilket tyder på att utloppet för grundvattnet i sluttningen är i närheten av rör E4 och inte vid rör E7 som enligt min tankemodell. Det skulle kunna vara så att vatten plötsligt trycks tillbaka med stor kraft som förklarar den mycket snabba responsen som sker mellan klockan 14-16 den 25 november 1995. Det kan vara en kombination av dessa två teorier eller också något annat som styr. Gradienten i grundvattenståndet mellan rör E2 och E4 är mycket hög strax innan stigningen i rör E4 sätter fart. Rimligtvis bör då det ske en viss transport från rör E2 till E4 enligt Darcys lag och kontinuitetsekvationen. Även mellan rör E4 och E5 är det en viss gradient i grundvattenytan och en transport bör ske till rör E4 från E5.

Rör E2 stiger inte särskilt fort utom i början. Däremot stiger den mest av alla rör och får transektens högst belägna grundvattenyta vid stigningens slutskede. Det kan visserligen förklaras med relativt fint porsystem i kombination med låg hydraulisk konduktivitet som gör att vattnet kan ha svårt att transporteras iväg snabbt nog. Dock börjar grundvattnet snabbast sjunka vid detta rör medan grundvattennivån stabiliserar sig bland de övriga rören.

Rör E6 har en liten lustig stigningstopp just innan grundvattnet når 2 cm och stigningen planar av. Det kan tyda på något lerlager. Röret reagerar ca 5-6 timmar långsammare än rör E7. Rör E5 är ytterligare någon timme långsammare än E6. Annars är stigningsförloppet hos rör E5 ungefär samma som hos rör E2.

Sammanfattningsvis kan sägas att den hydrauliska konduktiviteten och den effektiva porositeten verkar vara de markfaktorer som mest styr grundvattnets stigningsförlopp. Bägge är en funktion av kombinationen avståndet till markytan och markens läge i avrinningsområdet.

3.3 Val av statistisk metod

Korrelationsanalysen kräver av varandra oberoende mätdata för att vara lämplig. Då korrelationen av vattenlinjerna var väl hög för att helt kunna anta oberoende mätdata gör detta att klassisk korrelationsanalys är mindre lämplig (Jansson pers. med.). Metoden kräver också normalfördelning (Newbold 1991) för att vara giltig. Grundvattenståndet är snarare årstidsbundet än normalfördelat. Metoden är också känslig för kraftigt avvikande mätpunkter, även om det finns metoder för att kringgå detta, t.ex. Spearmans rank correlation coefficient (Newbold 1991).

Ett annat angreppssätt vore ett semivariogram där korrelationen plottas mot avståndet. Det är tveksamt om denna modell är tillämpbar på den typen av mätningar i transekt A och B där varje rör i princip motsvarar ett eget avrinningsområde i mikroskala. Kanske skulle en sådan metod vara tillämplig på bortre delen av transekt B där flera närliggande rör är väl korrelerade med varandra. Däremot är den inte tillämplig i transekt E där alla rören sitter i ett enda avrinningsområde i mikroskala, d.v.s. tendens (Stendahl pers. med.). För tendens passar klassisk statistik bättre. Något som komplicerar /geo/statistisk behandling av grundvattnet är dess stora variabilitet i tiden jämfört med t.ex. mårtjocklek eller mark-pH som kan anses relativt konstant över året. Genom att grundvattnet transporteras från punkt A till punkt B (eller *vice versa*) kommer variationsmönstret över tiden att vara förskjutet mot varandra. Detta gör att val av tidpunkt för mätning måste väljas mycket noggrant.

4. SLUTSATSER

En slutsats är att området är mycket heterogent och att två mätpunkter nära varandra kan ha betydligt större olikhet i grundvattenförlopp med varandra än två mätpunkter relativt avlägsna varandra.

En annan slutsats är att det är svårt att dra några säkra slutsatser om markens hydrologiska egenskaper genom blåsrörmätningar varannan vecka. Mätpunkterna bör ligga betydligt tätare, helst flera observationer/dag, för att sådana slutsatser ska kunna dras då grundvattenstigningen kan ske mycket snabbt. För så täta mätningar passar tryckgivare kopplat till logger perfekt. Manuella mätningar passar bäst då en generell grundvattenstatus över större områden och längre tid ska undersökas t.ex. för bakgrund till hydrologiska prognoser.

Det kan vara svårt att förutsäga grundvattnets exakta flödesväg, enbart genom att undersöka topografin och vegetationen. Naturen bjuder ofta på överraskningar som dock kan avslöjas genom undersökning av grundvattenlinjer.

Markens hydrauliska konduktivitet och markens effektiva porositet kan vara de markfaktorer som mest styr grundvattenytans fluktuationer över tiden.

Matematiska modeller kräver en hel del korrekt indata, om de ska kunna ge pålitliga svar. Saknas korrekt indata blir jämförelser med mer empiriska modeller svåra att göra.

Vissa - rent praktiska erfarenheter erhöles i samband med slamsugning av rören. Efter lite olika försök fann jag att en ca 5 liters trycksäker E-kolv var lämplig samt att inga förträngningar (flaskhalsar), som kan sättas igen, bör finnas i slangen från grundvattenrörets botten till E-kolven. Slangen bör från början vara av ganska grov dimension (minst ca 2 cm i diameter) för att inte sättas igen så lätt. Däremot kan slangen mellan E-kolv och tensiometerpump med fördel vara av smal dimension. Det bör hållas inte snålas på tillfört vatten, annars försåras slamsugning.

För att förhindra att rören slammar igen kan rören kläs in i en filtstrumpa. Risken finns dock att filtstrumpan kan fördröja responsen av grundvattenstigningar genom dålig genomsläpplighet.

5. TACKORD

Det finns ett antal personer utan vars hjälp mitt exjobb vore ogenomförbart. Först och främst skulle jag vilja tacka professor Per-Erik Jansson för all tid och energi han har lagt ner som handledare och examinator. Jag vill också rikta ett stort tack till försöksledare Jan Lindström för all hjälp jag fick med fältdelen och alla värdefulla tips jag mottagit. Tack till agronom Håkan Alfredsson för hjälp med avvägning. Jag vill också rikta ett stort tack till Bengt Norén för installationshjälp av tryckgivarna. Jag vill också tacka agronom Lave Persson för allmän hjälp med verktyg och gummiproppar m.m. Vidare vill jag rikta ett stort tack till agronom Erik Kellner, Meelis Mölder, Magnus Eriksson, Pär Nyman och meteorologerna på F16 för gratis översändande av diverse klimatdata. Till sist vill jag också tacka David Gustafsson för professionellt opponentskap, agronom Ragnar Persson för allmän datahjälp, David Moon för språkgranskning av abstract och Kerstin Berglund för alla redaktionella råd.

6. REFERENSER

Espeby, B. 1987. Water Flow in a Forest Till Slope - Field Studies and Physically Based Modelling. Inst. f. mark och vattenresurser, Kungliga Tekniska Högskolan. Avhandling 33 s.

Green, W. H. och Amt, G. A. 1911. Studies on Soil Physics: 1 Flow of Air and Water through the Soils. J. Agr. Sci. 4:1-24. I Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic press, San Diego, 364 s.

Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic press, San Diego, 364 s.

Horton, R. E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 5:399-417. I Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic press, San Diego, 364 s.

Johansson, P-O. 1987. Methods for Estimation of Direct natural Groundwater Recharge in Humid Climates - With Examples from Sandy Till Aquifers in South-eastern Sweden. Inst. F Kulturteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. Avhandling. 19 s.

Koorevaar, P., Menelik, G. och Dirksen, C. 1983. Elements of Soil Physics. Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, 230 s.

Lindahl, A. 1996. Modellering av avdunstning utgående från markfuktighetsmätningar i moränmark. Inst. f. Geovetenskap, Avd. f. Hydrologi, Uppsala Universitet. Examensarbete 20 p. 29 s.

Lundin, L. 1982. Mark och grundvatten i moränmark och marktypens betydelse för avrinningen. Naturgeografiska institutionen, avd. f. hydrologi, Uppsala Universitet. UNGI rapport nr 56.

Newbold, P. 1991. Statistics for Business and Economics. 3rd edition. Prentice-Hall International Editions, London. 930 s.

Personliga meddelanden

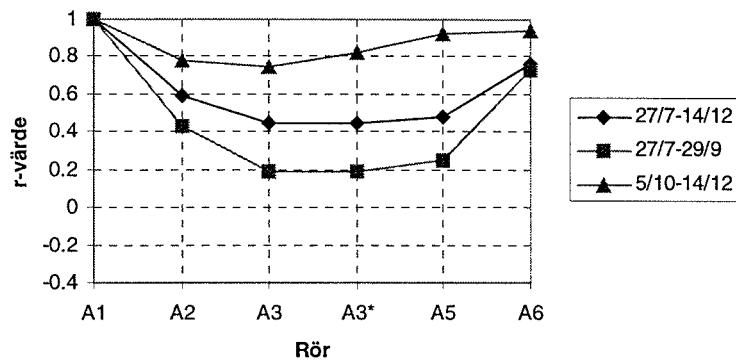
Per-Erik Jansson. Professor Avd. f. Biogeofysik, Inst. f Markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

Johan Stendahl. Doktorand, Inst .f. Skoglig marklära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

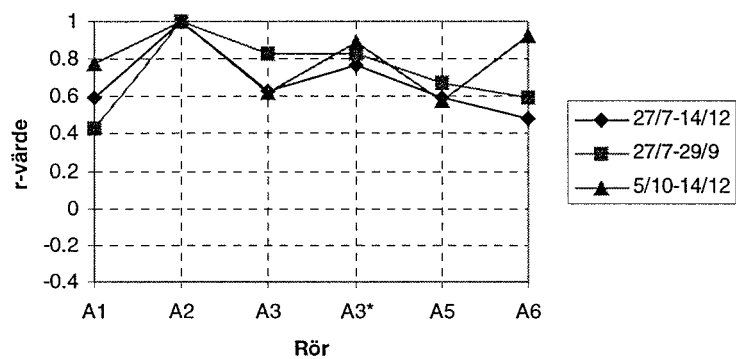
7. APPENDIX

7.1 Korrelation inom transekt A

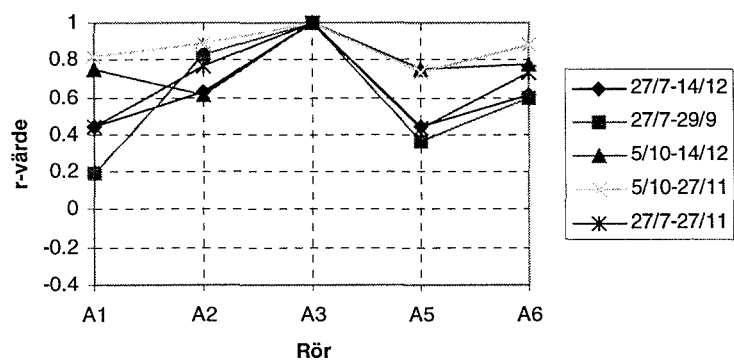
Korrelationsskillnader under olika delar av
mätperioden mellan rör A1 och transekt A



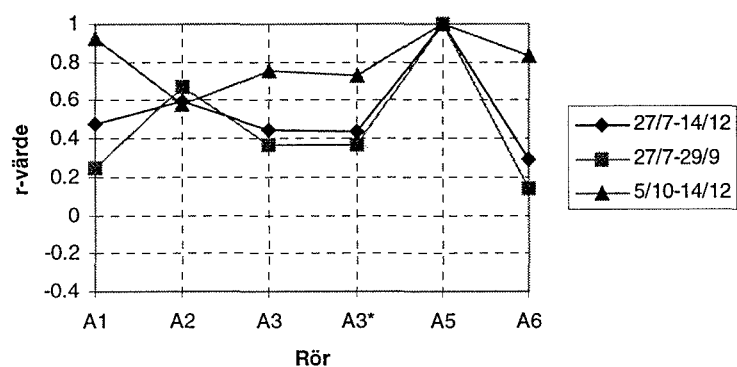
Korrelationsskillnader under olika delar av
mätperioden mellan rör A2 och transekt A



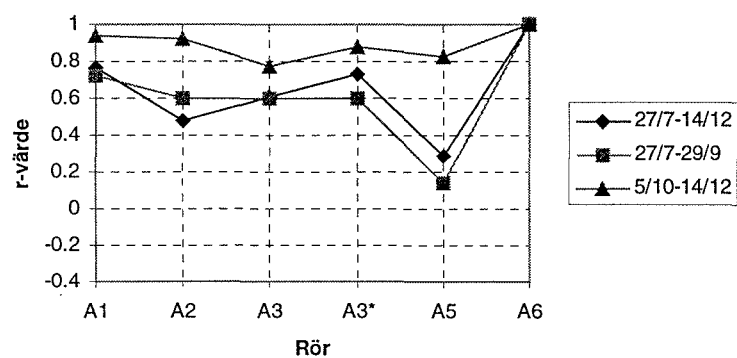
Korrelationsskillnader under olika delar av
mätperioden mellan rör A3 och transekt A



Korrelationsskillnader under olika delar av
mätperioden mellan rör A5 och transekt A

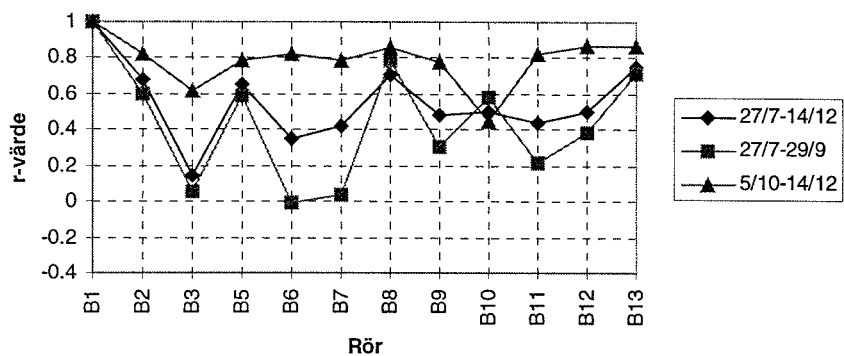


Korrelationsskillnader under olika delar av
mätperioden mellan rör A6 och transekt A

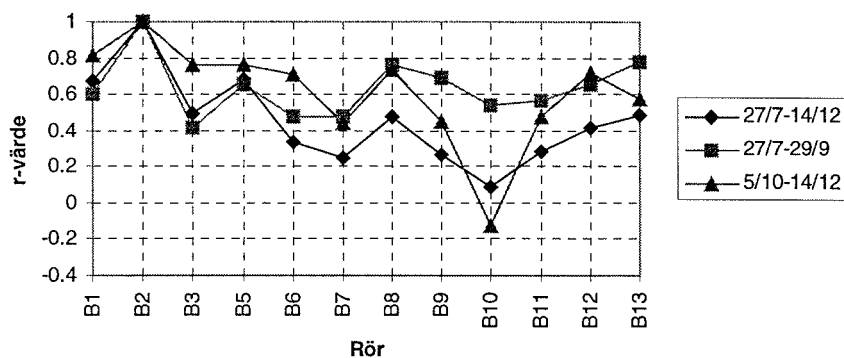


7.2 Korrelation inom transekt B

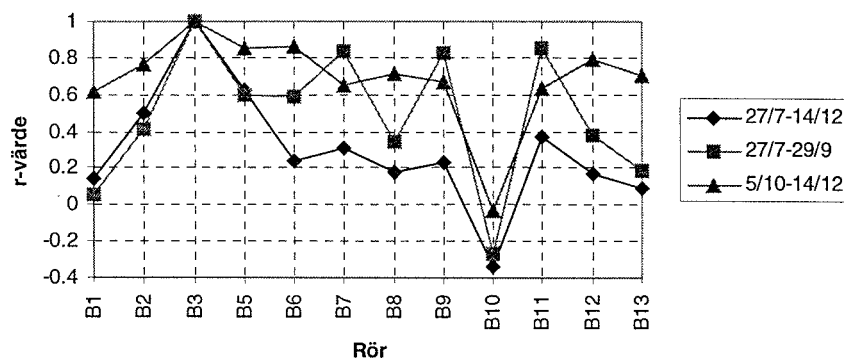
Korrelation mellan rör B1 och transekt B under olika delar av mätperioden



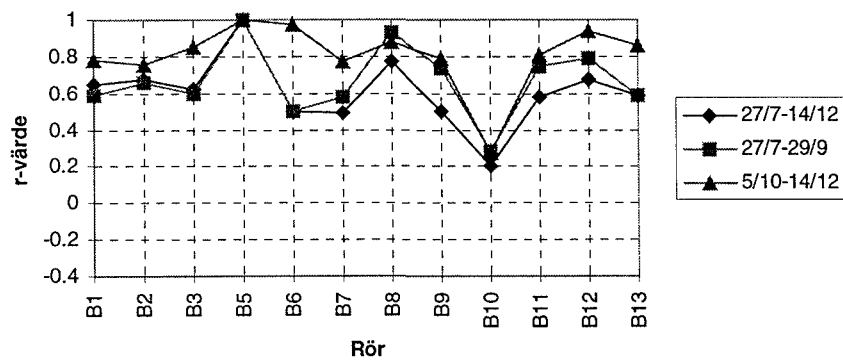
Korrelation mellan rör B2 och transekt B under olika delar av mätperioden



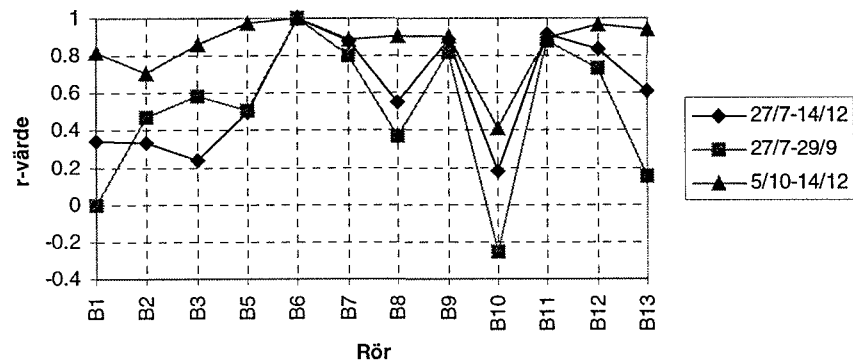
Korrelation mellan rör B3 och transekt B under olika delar av mätperioden



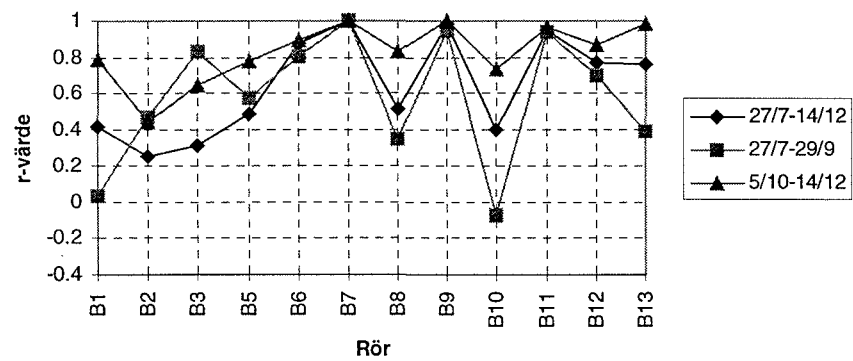
Korrelation mellan rör B5 och transekt B under olika delar av mätperioden



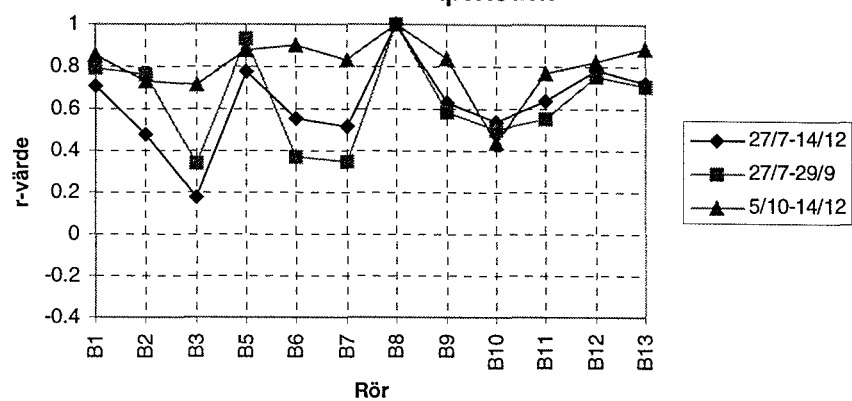
Korrelation mellan rör B6 och transekt B under olika delar av mätperioden



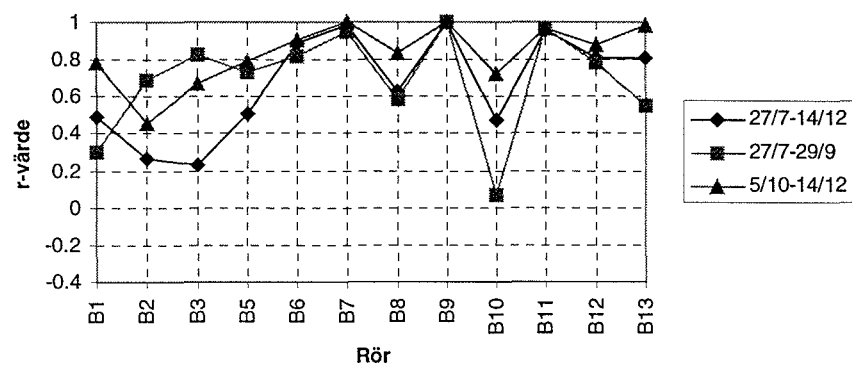
Korrelation mellan rör B7 och transekt B under olika delar av mätperioden



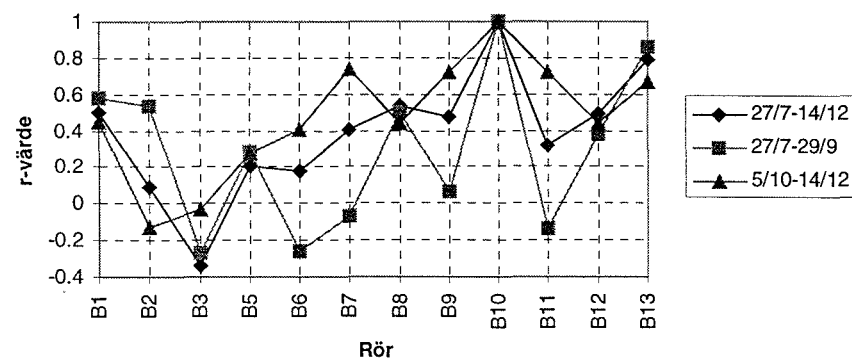
Korrelation mellan rör B8 och transekt B under olika delar av mätperioden



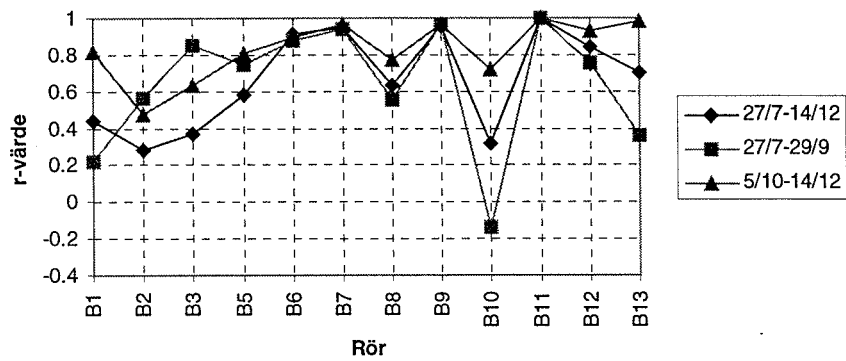
Korrelation mellan rör B9 och transekt B under olika delar av mätperioden



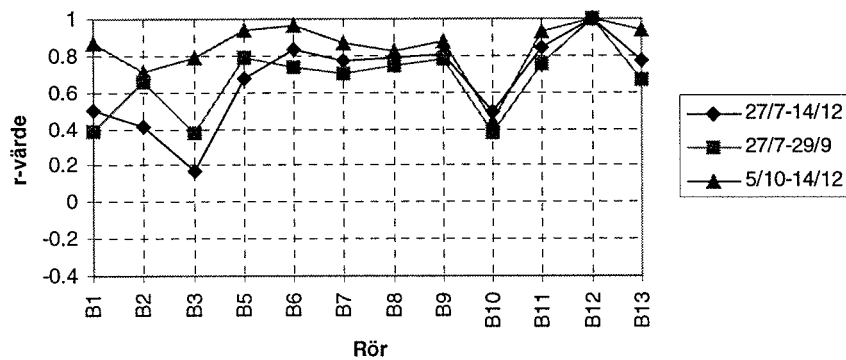
Korrelation mellan rör B10 och transekt B under olika delar av mätperioden



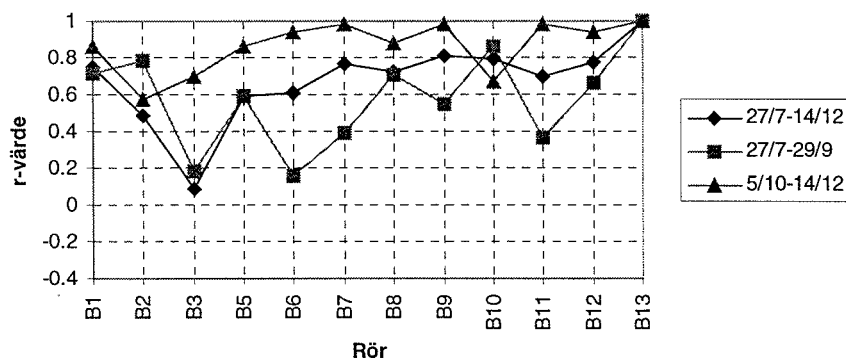
Korrelation mellan rör B11 och transekt B under olika delar av mätperioden



Korrelation mellan rör B12 och transekt B under olika delar av mätperioden



Korrelation mellan rör B13 och transekt B under olika delar av mätperioden



7.3 God korrelation mellan dessa rör

Korrelation mellan dessa rör under hela perioden 27/7-14/12 1995 på Norunda

Högsta säkerhet ($\alpha < 0.005$) = fet stil

Näst högsta säkerhet ($0.01 < \alpha < 0.005$) = kursiv stil

A1-A6	<i>B1-A1</i>	<i>B7-A1</i>	<i>B11-A6</i>
<i>A1-B1</i>	<i>B1-A2</i>	<i>B7-A6</i>	B11-B6
<i>A1-B7</i>	<i>B1-A6</i>	B7-B6	B11-B7
<i>A1-B9</i>	B1-B2	B7-B9	<i>B11-B8</i>
	<i>B1-B5</i>	B7-B11	B11-B9
<i>A2-A3</i>	B1-B8	B7-B12	B11-B12
A2-A3*	B1-B13	B7-B13	B11-B13
<i>A2-B1</i>			
A2-B2	B2-A2	B8-B1	B12-B5
	B2-B1	B8-B5	B12-B6
<i>A3-A2</i>	B2-B5	<i>B8-B9</i>	B12-B7
A3*-A2		<i>B8-B11</i>	B12-B8
	<i>B3-B5</i>	B8-B12	B12-B9
A5-B10		B8-B13	B12-B11
A5-B13	<i>B5-B1</i>		B12-B13
	B5-B2	<i>B9-A1</i>	
A6-A1	<i>B5-B3</i>	B9-A6	B13-A5
<i>A6-B1</i>	B5-B8	B9-B6	B13-A6
A6-B6	B5-B12	B9-B7	B13-B1
<i>A6-B7</i>		<i>B9-B8</i>	<i>B13-B6</i>
A6-B9	B6-A6	B9-B11	B13-B7
<i>A6-B11</i>	B6-B7	B9-B12	B13-B8
A6-B13	B6-B9	B9-B13	B13-B9
	B6-B11		B13-B10
	B6-B12	B10-A5	B13-B11
	<i>B6-B13</i>	B10-B13	B13-B12

Korrelation mellan dessa rör under hela perioden 27/7-29/9 1995 på Norunda

Högsta säkerhet ($\alpha < 0.005$) = fet stil

Näst högsta säkerhet ($0.01 < \alpha < 0.005$) = kursiv stil

<i>A2-A3</i>	B5-B8	<i>B9-B3</i>	<i>B11-B3</i>
		B9-B7	B11-B6
<i>A3-A2</i>	B6-B11	B9-B11	B11-B7
			B11-B9
<i>A5-B10</i>	<i>B7-B3</i>	<i>B10-A5</i>	
	B7-B9	<i>B10-B13</i>	<i>B13-B10</i>
<i>B3-B7</i>	B7-B11		
<i>B3-B9</i>			
<i>B3-B11</i>	B8-B5		

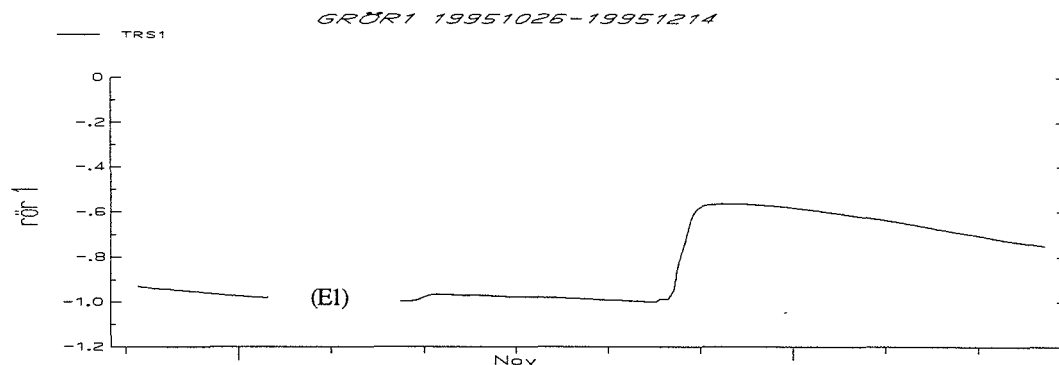
Korrelation mellan dessa rör under hela perioden 5/10-14/12 1995 på Norunda

Högsta säkerhet ($\alpha < 0.005$) = fet stil

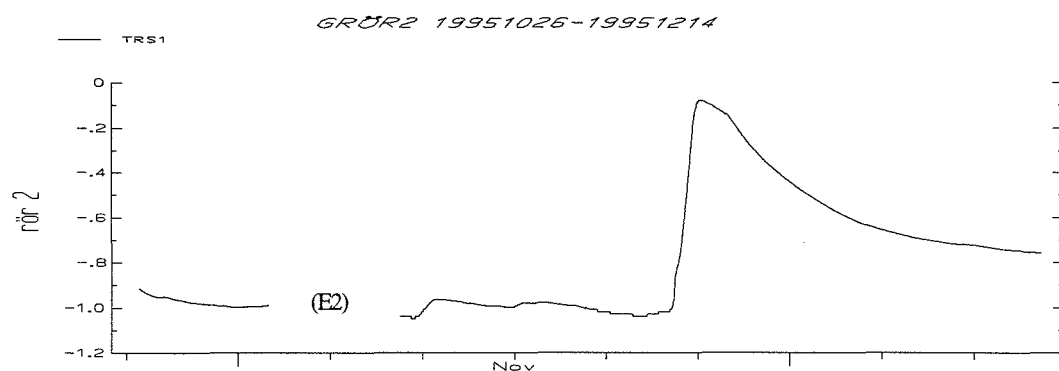
Näst högsta säkerhet ($0.01 < \alpha < 0.005$) = kursiv stil

A1/E2-A5	A6-A1/E2	B6-A1/E2	<i>B10-E1</i>	E3-A1/E2
A1/E2-A6	A6-A2/E7	B6-A3		E3-A5
A1/E2-B1	<i>A6-A3*</i>	<i>B6-A3*</i>	B11-A1/E2	<i>E3-A6</i>
A1/E2-B5	<i>A6-A5</i>	B6-A5	<i>B11-A3</i>	E3-B1
A1/E2-B6	A6-B1	B6-A6	B11-A5	<i>E3-B5</i>
A1/E2-B7	<i>A6-B3</i>	<i>B6-B3</i>	B11-B6	E3-B6
A1/E2-B8	A6-B5	B6-B5	B11-B7	E3-B7
A1/E2-B9	A6-B6	B6-B7	B11-B9	E3-B8
A1/E2-B11	A6-B8	B6-B8	B11-B12	E3-B9
A1/E2-B12	A6-B12	B6-B9	B11-B13	E3-B11
A1/E2-B13	A6-B13	B6-B11	B11-E3	E3-B12
A1/E2-E3	<i>A6-E3</i>	B6-B12	B11-E4	E3-B13
A1/E2-E4	A6-E6	B6-B13		E3-E4
<i>A1/E2-E6</i>		B6-E3	B12-A1/E2	<i>E3-E5</i>
	B1-A1/E2	B6-E6	B12-A3	
<i>A2/E7-A3*</i>	<i>B1-A5</i>		B12-A3*	E4-A1/E2
A2/E7-A6	B1-A6	B7-A1/E2	B12-A5	E4-A5
A2/E7-B2	<i>B1-B8</i>	B7-A5	B12-A6	E4-B1
<i>A2/E7-B5</i>	B1-B12	B7-B6	B12-B1	E4-B7
	<i>B1-B13</i>	<i>B7-B8</i>	B12-B5	E4-B9
<i>A3*-A2/E7</i>	B1-E3	B7-B9	B12-B6	E4-B11
<i>A3*-A6</i>	B1-E4	B7-B11	B12-B7	<i>E4-B12</i>
<i>A3-B5</i>		B7-B12	B12-B9	E4-B13
<i>A3*-B6</i>	B2-A2/E7	B7-B13	B12-B11	<i>E4-E1</i>
A3-B6	<i>B2-E6</i>	<i>B7-E1</i>	B12-B13	E4-E3
<i>A3-B11</i>		B7-E3	B12-E3	E4-E5
A3-B12	<i>B3-A6</i>	B7-E4	<i>B12-E4</i>	
A3*-B12	<i>B3-B5</i>	<i>B7-E5</i>	B12-E6	E5-A5
<i>A3-E6</i>	<i>B3-B6</i>			<i>E5-B7</i>
A3*-E6	B3-E6	B8-A1/E2	B13-A1/E2	E5-E1
		<i>B8-A5</i>	B13-A5	<i>E5-E3</i>
A5-A1/E2	B5-A1/E2	B8-A6	B13-A6	E5-E4
<i>A5-A6</i>	<i>B5-A2/E7</i>	B8-B1	<i>B13-B1</i>	
<i>A5-B1</i>	<i>B5-A3</i>	B8-B5	<i>B13-B5</i>	E6-A1/E2
A5-B6	B5-A6	B8-B6	B13-B6	E6-A2/E7
A5-B7	<i>B5-B3</i>	B8-B7	B13-B7	<i>E6-A3</i>
<i>A5-B8</i>	B5-B6	B8-B9	B13-B8	E6-A3*
A5-B9	B5-B8	B8-B13	B13-B9	E6-A6
A5-B11	B5-B12	B8-E3	B13-B11	<i>E6-B2</i>
A5-B12	<i>B5-B13</i>		B13-B12	E6-B3
A5-B13	<i>B5-E3</i>	B9-A1/E2	B13-E3	E6-B5
<i>A5-E1</i>	B5-E6	B9-A5	B13-E4	E6-B6
A5-E3		B9-B6		E6-B12
A5-E4		B9-B7	<i>E1-A5</i>	
A5-E5		<i>B9-B8</i>	<i>E1-B7</i>	
		B9-B11	<i>E1-B10</i>	
		B9-B12	<i>E1-E4</i>	
		B9-B13	E1-E5	
		B9-E3		
		B9-E4		

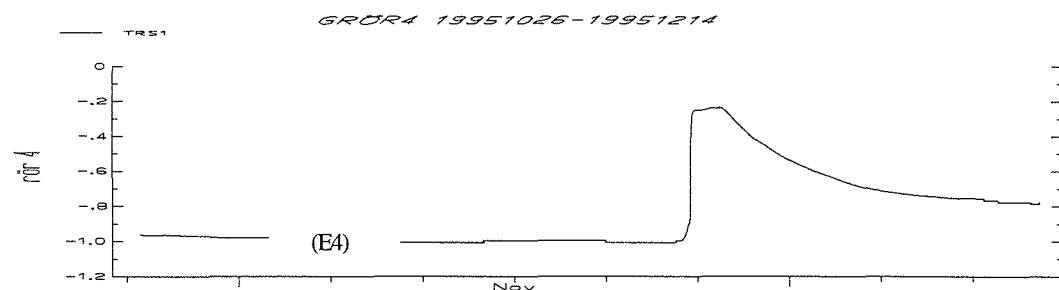
7.4 Resultat rör för rör av de automatiska mätningarna i transekt E



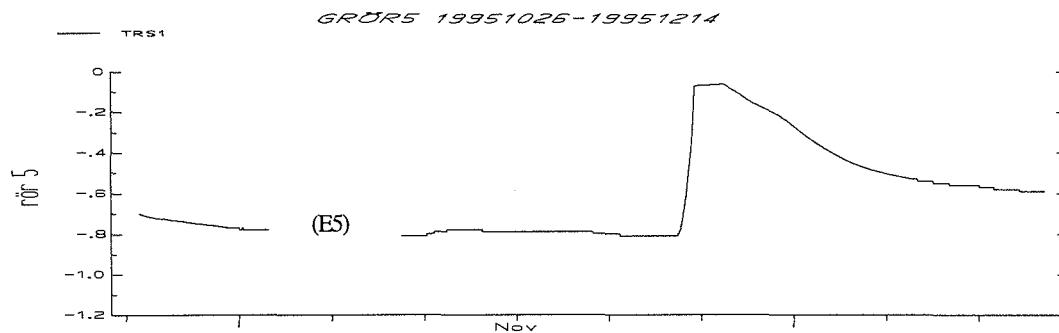
Rör E1 har en mycket stelt förlopp med en relativ jämn förlopp fram till grundvattens kraftiga stigning med 4 dm kring den 24 november och en svag avklingning, 1,5 dm från den 27 november. En svag stigning märks den 8-10 november.



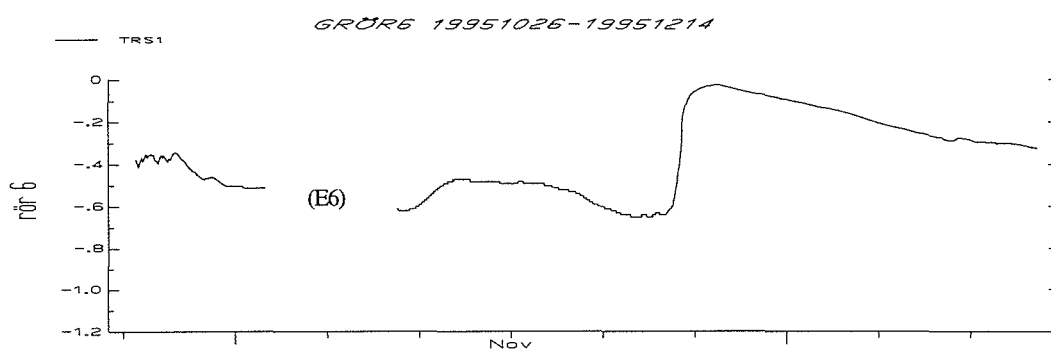
Rör E2 har en svag stigning den 10-12 november med knappt 1 dm och en i övrigt lite fluktuerande kurva fram till den stora stigningen med 9 dm. Avklingningen, 6,5 dm, är "snäll" och mycket tydlig.



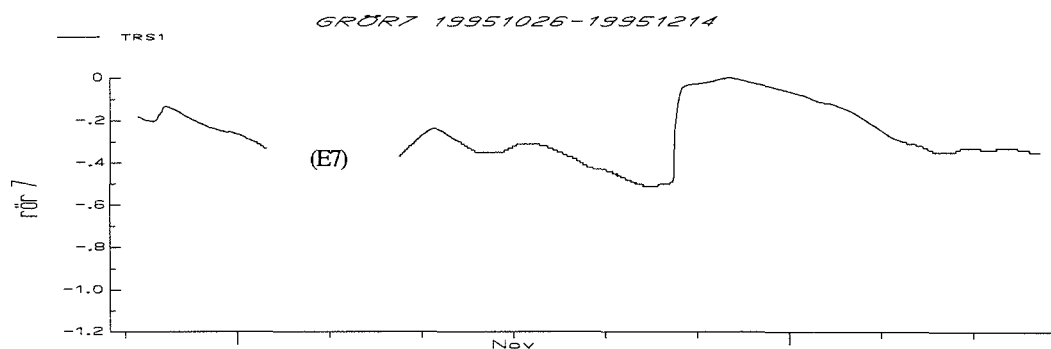
Rör E4 har en ganska slät kurva fram till den stora stigningen med ca 8 dm. Toppen är lite lustig då den ser "avhuggen" ut. Avklingningen, 5,5 dm, är slät men lite fluktuerande de sista 5 dagarna.



Rör E5 har en ganska liknande kurva som rör E4 men en tydligare avklingning, 1 dm, i början på mätperioden och grundvattenstigningen är 7 dm. En viss stigning den 12-13 november märks. Den stora avklingningen är 5 dm.



Rör E6 är mycket fluktuerande fram till den stora stigningen, 5 dm, samt de sista 7 dagarna. Den stora avklingningen var ca 3 dm. Det fanns också en mindre avklingning i början av mätperioden på 1,5 dm och ytterligare en avklingning den 17-22 november på 2 dm samt en motsvarande stigning 10-13 november med 1,5 dm.



Rör E7 är ännu känsligare än rör E6. Med mycket fluktuationer och små stigningar och avklingningar. En svag stigning, 1 dm sker redan 28 oktober och följs av en avklingning 29/10-2/11 på 2 dm. En stigning sker 9-11 november med 1,5 dm för att 12-13 november återigen sjunka 1,5 dm. En svag stigning sker 15 november med 0,5 dm för att sedan sjunka 2,5 dm 17-23 november. Den stora stigningen är 5 dm men med en kraftig stigning först på 4,5 dm och sedan en svag stigning 26-28 november. Avklingningen är ca 3 dm.

7.5 Lista över symboler

H	Totalpotential (m.v.p.)
H	Avståndet mellan grundvattenbågen och det ogenomträngliga lagret (m)
H_g	Gravitationspotential (m.v.p.)
H_{\max}	Maximala avståndet mellan grundvattenbågen och det ogenomträngliga lagret (m)
H_o	Osmotisk potential (m.v.p.)
H_t	Tryckpotential (m.v.p.)
I	Infiltrerad mängd vatten (m^3)
Q	Flödestäthet (m^3/s)
S	Avstånd mellan två dräneringsrör (m)
b	Karakteriseringskonstant (-)
d_a	Avstånd mellan dräneringsrör och den ogenomträngliga botten (m)
g	Gravitationskonstant (9,82 N/kg)
h	Avståndet i z-led mellan grundvattenbågen och dräneringsrören (m)
h_{\max}	Det maximala avståndet i z-led mellan grundvattenbågen och dräneringsrören (m)
i	Infiltrationstäthet (m^3/s)
i_c	Steady-state infiltrationstäthet (m^3/s)
i_0	Infiltrationstäthet vid $t=0$ (m^3/s)
k	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
k	Karakteriseringskonstant (-)
q	Flöde (m/s)
q_x	Flöde i x-led (m/s)
q_y	Flöde i y-led (m/s)
q_z	Flöde i z-led (m/s)
r_i	Porradie (m)
r_{\max}	Maximal porradie (m)
s	Sträcka (valfri riktning) (m)
t	Tid (s)
x	Horisontellt avstånd till närmsta dräneringsrör (m)
x	Sträcka i x-led (m)
y	Sträcka i y-led (m)
z	Sträcka i z-led (m)
η	Vattnets dynamiska viskositet (Pas)
φ	Vinkeln på vattnet krökta menisk vid porväggen (rad)
θ	Vattenhalt (volym-%)
σ	Vattnets ytspänning (0,07 N/m)
ρ	Vattnets densitet (1000 kg/m^3)
τ	Slingrighetskonstant, tourtositetskonstant (-)

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP.
AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. AVDELNINGSMEDDELANDE. Fr o m 1995

- 95:1 Alavi, G. Radial stem growth and transpiration of Norway spruce in relation to soil water availability. Granens tillväxt och transpiration i relation till markvattnets tillgänglighet (Licenciatavhandling). 13 + 11 + 14 s.
- 95:2 Johansson, W. & Fellin, O. Biogas från vall. Teknik och ekonomi vid odling, skörd, transporter, ensilering samt rötning med tvåstegsteknik. 38 s.
- 95:3 Svensson, E., Linnér, H. & Carlsson, H. Utvärdering av växtanalys i fabrikspotatis. 53 s.
- 95:4 Andersson, A. Vattentillgångar för bevattning i Kalmar län. I. Litteraturoversikt. II. Intervjuundersökning rörande vattenmagasin. 48 s.
- 95:5 Wesström, I. Bestämning av markens salthalt genom mätning med konduktivitetssond. 18 s.
- 95:6 Eckersten, H., Jansson, P-E., Karlsson, S., Persson, B., Perttu, K. & Andersson, J. En introduktion till biogeofysik. 72 s.
- 95:7 Eckersten, H. Simulation of water flow in plant communities. SPAC model description, exercises and user's manual. 49 s.
- 95:8 Nabieian, F. Simulering av vattenbalans för energiskog på en torvmark. 25 s.
- 96:1 Eckersten, H., Jansson, P-E., & Johnsson, H. SOILN model, user's manual. Version 9.1. 93 s.
- 96:2 Eckersten, H., Jansson, P-E., Karlsson, S., Lindroth, A., Persson, B., Perttu, K. & Andersson, J. En introduktion till biogeofysik, 2:a upplagan. 110 s.
- 96:3 Carlsson, H., Larsson, K. & Linnér, H. Växtnäringsstyrning i potatis. 69 s.
- 97:1 Uppenberg, S., Wallgren, O. & Åhman, M. Saturated hydraulic conductivity in an acid sulphate soil. A minor field study in the the Vietnamese Mekong delta. 45 s.
- 97:2 Djodjic, F. Avrinningsmönster i ett litet åkerområde under 40 år av successiv urbanisering. 38 s.
- 97:3 Vukovic, M. The effect of soil hydraulic properties on ground water fluctuations in a heavy clay soil. Measurements and simulations. 43 s.
- 97:4 Eckersten, H., Jansson, P-E., Karlsson, S., Lindroth, A., Persson, B., Perttu, K., Carlsson, M., Lewan, L. & Blombäck, K. En introduktion till biogeofysik, 3:e upplagan. 130 s.
- 97:5 Eckersten, H. Simulation of water flow in plant communities. SPAC model description, exercises and user's manual. 2nd edition. SPAC version 5.0. 52 s.
- 98:1 Lustig, T. Land Evaluation Methodology. Small-Scale Agro-Pastoralist Farming Systems. Agricultural community case study in the IV region of Chile. 91 s.
- 98:2 Jansson, P-E. Simulating model for soil water and heat conditions. Description of the SOIL model. 81 s.
- 98:3 Casanova, M. Influence of slope gradient and aspect on soil hydraulic conductivity measured with tension infiltrometer. Field study in the Central Zone of Chile. 50 s.
- 98:4 Ingvar-Nilsson, N. Variationsmönster hos grundvattennivåerna i skogsmark. Fältstudier i Norunda hösten 1995. 52 s.

